

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DEL SATÉLITE GOES-ESTE SOBRE COSTA RICA
DURANTE LA TORMENTA TROPICAL NATE

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado y título
de Maestría Profesional en Meteorología Operativa

ELADIO HUMBERTO SOLANO LEÓN

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

Dedicatoria

Quiero dedicar esta investigación a Dios en primer lugar, por darme la vida, salud y la dicha de haber nacido en este país y en el seno de una familia con principios que me permitieron tener esta oportunidad de servirle a mi país con mi trabajo.

Luego, deseo hacer una dedicatoria muy especial mis abuelos paternos Vidal Solano (qdDg) y Ofelia Arguedas (qdDg), quienes en el transcurso de esta maestría pasaron al lado del Señor, dejando un vacío que siempre será irremplazable, pero también marcando mi vida con una huella indeleble, ya que siempre me mostraron su cariño y amor en todo momento, lo cual guardaré el resto de mi vida.

A mis abuelos maternos Eladio León y Blanca Mora, quienes fueron más que mis abuelos mis papás por mucho tiempo durante mi niñez, siendo forjadores en muchos aspectos de una gran cantidad de valores que hoy siento arraigados en mi persona.

A mi esposa Paula, quien me acompañó, apoyó en gran manera y estuvo a mi lado en el desarrollo de esta investigación.

A mi hijo Gabriel, que se ha convertido en la bendición más grande de mi vida en los últimos meses y a quien espero ver crecer y convertirse en una persona de bien.

A mis padres Ana y Humberto, quienes tuvieron la virtud de brindarme la oportunidad de tener una educación formal adecuada, con todas las facilidades necesarias para lograr mis objetivos personales y a mi hermana Ana Patricia, porque siempre he podido contar con su apoyo y su cariño cuando más lo he necesitado.

Agradecimientos

A toda mi familia, porque de todos en algún momento de esta historia he sentido su apoyo incondicional, su lealtad y su cariño. Mención especial para mi incansable Madre, que sin duda fue la precursora de las cosas buenas que me han pasado y me seguirán pasando en la vida si es la voluntad de Dios que así sea.

Al Dr. Marcial Garbanzo, mi director de TFIA, quien gracias a sus valiosos aportes, consejos y enseñanzas me hicieron llegar a buen término esta investigación.

A la Dra. Ana María Durán, quien con sus consejos, sugerencias y enseñanzas me guió para el buen desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Gabriela Mora, quien con sus consejos, sugerencias y enseñanzas me guió para el buen desarrollo de esta investigación.

Al Meteorólogo Anthony Segura por su valioso apoyo en lo concerniente al procesamiento de la información utilizada para llevar a cabo esta investigación.

A todos mis compañeros de trabajo y a los profesores de la Maestría, por su apoyo y su guía en el desarrollo de los cursos de la maestría.

Hoja de aprobación

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Meteorología Operativa.”




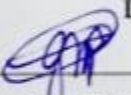
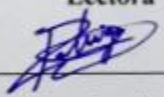


Dr. Erick Rivera Fernández
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Marcial Garbanzo Salas
Profesor Guía

Dra. Ana María Durán Quesada
Lectora

Dra. Gabriela Mora Rojas
Lectora

Dr. Rodrigo Castillo Rodríguez
Representante de la Directora
Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera

Eladio Humberto Solano León

Tabla de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Hoja de aprobación.....	iv
Resumen	vii
Abstract	viii
Lista de cuadros.....	ix
Lista de figuras	x
Lista de abreviaturas.....	xvi
Capítulo 1	1
1 Introducción	1
1.1 Fundamentos de satélites.....	3
1.1.1 Satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite).....	3
1.1.2 Satélite GOES-ESTE.....	5
1.1.3 Generador avanzado de imágenes base (<i>Advanced Baseline Imager</i> , ABI).....	6
1.1.4 Bandas del espectro del ABI	7
1.1.4.1 Canales visibles: banda de 0.47 y 0.64 μm	8
1.1.4.2 Canales IR cercano: bandas de 0.86, 1.37, 1.6 y 2.2 μm	9
1.1.4.3 Canal IR de onda corta: banda de 3.9 μm	11
1.1.4.4 Canales IR de onda media: bandas de 6.2, 7.0 y 7.3 μm	11
1.1.4.5 Canales IR de onda larga: bandas de 8.5, 9.6, 10.3, 11.2, 12.3 y 13.3 μm	13
Capítulo 2.....	16
2 Marco teórico	16
2.1 Algoritmo de la tasa de lluvia del ABI del GOES-R.....	16
2.1.1 Descripción general del algoritmo	16
2.1.2 Calibración del algoritmo.....	17
2.2 Microondas por encima de visible o infrarrojo	18
2.2.1 Tipos de precipitación	18
2.2.2 Precipitación.....	19
2.2.3 Pronóstico de tasas de precipitación.....	19
2.3 Validación de datos de salida de algunos algoritmos de tasas de lluvia.....	20
2.4 Uso de imágenes satelitales para detección de lluvia severa.....	22
Capítulo 3	25

3 Metodología	25
3.1 Recolección y análisis de la información	25
3.1.1 Fuentes terrestres	25
3.1.2 Fuentes satelitales	26
3.2 Procedimiento	27
Capítulo 4	31
4 Análisis de datos	31
4.1 Serie de tiempo de lluvia y los canales del GOES	31
4.1.1 Comparación entre la lluvia y los canales 1, 2 y 3	31
4.1.2 Comparación entre la lluvia y los canales 4, 5 y 6	32
4.1.3 Comparación entre la lluvia y los canales 7, 8 y 9	33
4.1.4 Comparación entre la lluvia y los canales 10 y 11	34
4.1.5 Comparación entre la lluvia y los canales 12, 13, 14, 15 y 16	35
4.2 Algoritmos	36
4.2.1 Algoritmo creado y no seleccionado	37
4.2.2 Algoritmo creado y seleccionado	38
Capítulo 5	40
5. Resultados y discusión	40
5.1 Creación de una máscara a partir del algoritmo	40
5.2 Resultados del algoritmo	41
5.3 Ventajas del algoritmo	42
5.4 Validación inicial: Caso del 4-5 de octubre de 2018	43
5.5 Implementación de la herramienta en el IMN	45
Capítulo 6	47
6 Conclusiones y Recomendaciones	47
6.1. Conclusiones	47
6.2. Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Anexos	58
Anexo 1	58
Anexo 2	68

Resumen

Esta investigación tuvo como principal objetivo la construcción de un algoritmo de detección de nubes convectivas, que permitiera el aprovechamiento de los recursos satelitales de los que se dispone hoy en día en el país. Con lo anterior, se pretende generar información fundamental para los pronosticadores al momento de realizar sus pronósticos y avisos a la población, así como en la toma de decisiones por parte de las instituciones encargadas de la prevención y de la seguridad civil.

En este estudio se realizó un minucioso análisis de las imágenes satelitales de los 16 canales del satélite GOES-ESTE en el periodo entre el 2 y el 6 de octubre del año 2017 cada 15 minutos, abarcando días previos a la influencia de la Tormenta Tropical Nate, la afectación de esta y un periodo después de dicha afectación. Asimismo, se analizaron datos de lluvia de cada minuto en distintos puntos del país. Esta información fue presentada usando series de tiempo, lo cual ayudó mucho en la visualización de posibles relaciones en el comportamiento de estas variables.

A partir de este proceso de análisis se logró construir un algoritmo que permite la detección de zonas de convección profunda en la atmósfera. Dichas nubes convectivas suelen generar cantidades de precipitación sumamente altas que a su vez son causantes de inundaciones, fuertes vientos e intensa tormenta eléctrica, por lo que su impacto en la población y en la infraestructura es muy significativo. Esto se observó durante la Tormenta Tropical Nate y en el evento ocurrido aproximadamente un año después en Guanacaste y que sirvió como caso de validación para esta investigación.

Una de las repercusiones más importantes de este estudio, es la implementación del algoritmo en las actividades diarias del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica del Instituto Meteorológico Nacional. La relevancia de esta herramienta va más allá de solo detectar zonas con alta probabilidad de convección fuerte, ya que además brinda información en sitios donde muchas veces no existen estaciones meteorológicas automáticas, lo cual llena un importante vacío de información que actualmente se tiene en el IMN. Asimismo, este producto puede ser utilizado en los demás países de la región Centroamericana.

Finalmente, se espera los resultados de este trabajo den paso a la generación de otros productos derivados, que permitan atacar otros problemas que se presentan en los procesos operativos de las oficinas de pronóstico del tiempo de los países de la región.

Abstract

This research had as its main objective the construction of an algorithm for the detection of convective clouds, which would allow the use of the satellite resources available in the country. With the above, it is intended to generate fundamental information for forecasters at the time of making their forecasts and warnings to the population, as well as in decision-making by the institutions responsible for prevention and civil security.

In this study, a thorough analysis of the satellite images of the 16 channels of the GOES-EAST satellite was carried out in the period between October 2 and 6, 2017 every 15 minutes, covering days prior to the influence of Tropical Storm Nate, during the affectation of this and a period after said affectation. Likewise, rain data were analyzed every minute in different parts of the country. This information was presented using time series, which helped a lot in the visualization of possible relationships in the behavior of these variables.

From this analysis process, an algorithm was built that allows the detection of areas of deep convection in the atmosphere. These convective clouds usually generate extremely high amounts of precipitation that in turn are the cause of floods, strong winds and intense thunderstorms, so their impact on the population and infrastructure is very significant. This was observed during Tropical Storm Nate and at the event that occurred approximately one year later in Guanacaste and that served as a case of validation for this investigation.

One of the most important repercussions of this study is the implementation of the algorithm in the daily activities of the Department of Synoptic and Aeronautical Meteorology of the National Meteorological Institute. The relevance of this tool goes beyond just detecting areas with a high probability of strong convection, since it also provides information in places where there are often no automatic weather stations, which fills an important gap of information that currently exists in the IMN. Also, this product can be used in the other countries of the Central American region.

Finally, the results of this work are expected to give way to the generation of other derivative products, which allow attacking other problems that arise in the operational processes of the weather forecast offices of the countries of the region.

Lista de cuadros

Cuadro 1. Información sobre estaciones meteorológicas.....	25
------------------------------------------------------------	----

Lista de figuras

Figura 1. Posición relativa de los satélites de órbita geoestacionaria (GOES) y de órbita polar.....	4
Figura 2. Ilustración del desplazamiento de paralaje.....	5
Figura 3. Desplazamiento normalizado de una nube para una imagen satelital.....	6
Figura 4. Flujo de información a través del satélite GOES-ESTE (antiguo GOES-R).....	7
Figura 5. Representación de los 16 canales del satélite GOES-ESTE en el espectro electromagnético.....	8
Figura 6. Gráfica de las bandas espectrales visibles del ABI (línea continua negra) y gráficos espectrales para varias superficies.....	10
Figura 7. Gráfica de la respuesta espectral ABI (curva sombreada en azul) para las bandas del infrarrojo cercano del ABI.....	12
Figura 8. Gráfica de las funciones de temperatura de brillo para las tres bandas de vapor de agua del ABI.....	12
Figura 9. Gráfica de la temperatura de brillo para las bandas de onda larga del ABI.....	14
Figura 10. Mapa de Costa Rica con la posición geográfica de las estaciones utilizadas en la investigación.....	26
Figura 11. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	28
Figura 12. Aproximaciones progresivas sobre la estación meteorológica automática en Santa Cruz.....	29
Figura 13. Series de tiempo de la lluvia de la estación meteorológica del Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	32
Figura 14. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	33
Figura 15. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Palo Verde y de temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	34
Figura 16. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Palo Verde y de temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	35
Figura 17. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	36
Figura 18. Imágenes de los canales 4 y 5 del satélite GOES-ESTE.....	37
Figura 19. Imágenes de los canales 12 y 15 del satélite GOES-ESTE.....	38

Figura 20. Ejemplo de máscara creada a partir del algoritmo que se diseñó en esta investigación.....	40
Figura 21. Las imágenes son del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado.....	41
Figura 22. Imágenes del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado y sin aplicar el algoritmo.....	43
Figura 23. Las imágenes son del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado.....	44
Figura A1. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	58
Figura A2. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	58
Figura A3. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	59
Figura A4. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	59
Figura A5. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	59
Figura A6. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	60
Figura A7. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	60
Figura A8. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	60
Figura A9. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	61
Figura A10. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	61
Figura A11. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	61

Figura A12. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	62
Figura A13. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	62
Figura A14. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	62
Figura A15. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	63
Figura A16. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	63
Figura A17. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	63
Figura A18. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	64
Figura A19. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	64
Figura A20. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	64
Figura A21. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	65
Figura A22. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	65
Figura A23. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	65
Figura A24. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	66

Figura A25. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	66
Figura A26. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.....	66
Figura A27. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.....	67
Figura A28. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.....	67
Figura A29. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.....	67
Figura A30. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.....	68
Figura A31. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	68
Figura A32. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	69
Figura A33. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	69
Figura A34. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	70
Figura A35. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	70
Figura A36. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	71
Figura A37. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	71

Figura A38. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	72
Figura A39. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	72
Figura A40. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	73
Figura A41. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	73
Figura A42. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	74
Figura A43. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	74
Figura A44. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	75
Figura A45. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	75
Figura A46. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	76
Figura A47. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	76
Figura A48. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	77
Figura A49. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	77
Figura A50. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	78

Figura A51. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	78
Figura A52. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	79
Figura A53. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	79
Figura A54. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	80
Figura A55. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	80
Figura A56. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.....	81
Figura A57. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.....	81
Figura A58. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.....	82
Figura A59. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.....	82
Figura A60. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.....	83

Lista de abreviaturas

ABI	Generador Avanzado de Imágenes Base (Advanced Baseline Imager, por sus siglas en inglés)
AIP	Proyectos de Intercomparación de Algoritmos (Algorithm Intercomparison Projects, por sus siglas en inglés)
AMSU	Unidad Avanzada de Sondeo de Microondas (Advanced Microwave Sounding Unit, por sus siglas en inglés)
AMSU-B	Unidad-B Avanzada de Sondeo de Microondas (Advanced Microwave Sounding Unit-B, por sus siglas en inglés)
AOD	Profundidades Ópticas de los Aerosoles (Aerosol Óptica Depths, por sus siglas en inglés)
ATS	Satélite de Aplicaciones Tecnológicas (Application Technology Satellite, por sus siglas en inglés)
AVHRR	Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (Advanced Very High Resolution Radiometer, por sus siglas en inglés)
AWS	Estaciones Meteorológicas Automatizadas (Automated Weather Station, por sus siglas en inglés)
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CMORPH	Método “Morphing” del Centro de Predicción Climática (Climate Prediction Center Morphing Method, por sus siglas en inglés)
CT	Ciclones Tropicales
DCS	Sistema de Recolección de Datos (Data Collection System, por sus siglas en inglés)
EMWIN	Red de Información Meteorológica para Administradores de Emergencia (Emergency Managers Weather Information Network, por sus siglas en inglés)
EXIS	Sensores de Irradiancia de UV-Extrema y de Rayos-X (Extreme ultraviolet and X-Ray Irradiance Sensors, por sus siglas en inglés)
FF	Frentes Fríos
GLM	Mapeador de Rayos Geoestacionario (Geostationary Lightning Mapper, por sus siglas en inglés)

GOES	Satélite Ambiental Operacional Geoestacionario (Geostationary Operational Environmental Satellite, por sus siglas en inglés)
GRB	Servicio de Retransmisión de Datos del GOES (GOES Re-Broadcast, por sus siglas en inglés)
GMS	Satélite Meteorológico Geoestacionario (Geostationary Meteorological Satellite, por sus siglas en inglés)
HRPP	Productos de Precipitación de Alta Resolución (High-Resolution Precipitation Products, por sus siglas en inglés)
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
IR	Infrarrojo (Infrared)
LRIT	Servicios de Transmisión de Información a Baja Velocidad (Low Rate Information Transmission, por sus siglas en inglés)
MHS	Generador de Sondeo de Humedad de Microondas (Microwave Humidity Sounder, por sus siglas en inglés)
MSNM	Metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)
MW	Microonda (Microwave, por sus siglas en inglés)
NCEP	Centro Nacional de Predicciones Ambientales (National Center for Environmental Prediction, por sus siglas en inglés)
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés)
NESDIS	Servicio Nacional de Satélites Ambientales, Datos e Información (National Environmental Satellite, Data, and Information Service, por sus siglas en inglés)
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés).
NRL	Laboratorio Nacional de Investigación (National Research Laboratory, por sus siglas en inglés)
OMM	Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, por sus siglas en inglés)
OT	Ondas Tropicales
PEHRPP	Programa para Evaluar Productos de Precipitación de Alta Resolución (Program to Evaluate High Resolution Precipitation Product, por sus siglas en inglés)

PERSIANN	Estimación de Precipitación de Información de Sensores Remotos usando Redes Neuronales Artificiales (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks, por sus siglas en inglés)
PMW	Microondas pasivo (Passive Microwave, por sus siglas en inglés)
SARSAT	Seguimiento de Búsqueda y Rescate Asistido por Satélite (Search And Rescue Satellite Aided Tracking, por sus siglas en inglés)
SSM/I	Sensor Especial Generador de Imágenes de Microondas (Special Sensor Microwave / Imager, por sus siglas en inglés)
SSMIS	Sensor Especial Generador de Imágenes y Sondeos de Microondas (Special Sensor Microwave Imager / Sounder, por sus siglas en inglés)
SUVI	Generador de Imágenes UV Solar (Solar ultraviolet Imager, por sus siglas en inglés)
TMPA	Análisis de Precipitación Multisatelital del TRMM (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis, por sus siglas en inglés)
TOGA-COARE	Experimento de la Respuesta de la Interacción Atmósfera Global-Océano y del Acoplamiento Océano-Atmósfera en el Trópico (Tropical Ocean-Global Atmosphere, Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment, por sus siglas en inglés)
TRMM	Misión de Medición de Lluvia en los Trópicos (Tropical Rainfall Measuring Mission, por sus siglas en inglés)
TSM	Temperatura superficial del mar
VIS	Visible
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Eladio Solano León, con cédula de identidad 7-0139-0335, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis de las imágenes del satélite GOES-ESTE sobre Costa Rica durante la Tormenta Tropical Nate

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Eladio Humberto Solano León

Número de Carné: 983503 Número de cédula: 7-0139-0335

Correo Electrónico: eladio.solano@ucr.ac.cr

Fecha: 14/11/2019 Número de teléfono: 8824-3144

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Marcial Garbanzo Salas

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1

1 Introducción

En los últimos 50 años, se ha dado una gran evolución en el desarrollo de satélites geoestacionarios y sus aplicaciones. Esto ha permitido que a través de los años los meteorólogos puedan saber cuáles son las condiciones del estado del tiempo que predominan para un lugar determinado, permitiendo llevar a cabo acciones preventivas e informativas en pro de la seguridad de las personas y sus bienes.

La información obtenida mediante los satélites es vital durante eventos de lluvia fuerte, lo cual ha hecho que la interpretación correcta de las imágenes satelitales sea esencial para los meteorólogos. Además, dicha retroalimentación es muy importante en el proceso de toma de decisiones por parte de instituciones de protección civil y para advertir a la población en general acerca de cualquier fenómeno que atente contra su seguridad.

Las mejoras realizadas a los satélites geoestacionarios a través de los años se han dado principalmente en el aumento de la cantidad de imágenes disponibles durante las veinticuatro horas del día. Por otro lado, se dio un incremento de la velocidad con que estas se obtienen y de la cantidad y variedad de fenómenos que pueden ser observados mediante éstas. Esto es muy valioso ya que brinda una gran oportunidad para realizar la vigilancia de las condiciones meteorológicas en las zonas de cobertura del satélite en todo momento.

Debido a su posición geográfica, Costa Rica es un país muy vulnerable a diversos fenómenos hidrometeorológicos. Algunos de estos son los Ciclones Tropicales (CT) (Alfaro y Quesada, 2010), los Sistemas de Baja Presión (SBP) (Retana, 2012), las Ondas Tropicales (OT) de acuerdo con Serra et al., (2010) y los Frentes Fríos (FF) según Zárate (2005) y Retana (2012). Dichos fenómenos poseen una estacionalidad muy marcada. Por ejemplo, la temporada de CT en el Atlántico va del 1° de junio al 30 de noviembre, mientras que la temporada de FF suele presentarse entre noviembre y febrero aproximadamente. Por la tanto, en Costa Rica existen probabilidades de tener eventos extremos casi todo el año.

Durante el periodo de los meses de agosto-setiembre-octubre se presenta la mayor frecuencia de CT en el Mar Caribe, mencionado en investigaciones realizadas por Taylor y Alfaro (2005) y Retana (2012). Asimismo, pueden ocurrir eventos severos fuera de esos

períodos como sucedió con la Tormenta Tropical Alma (en mayo de 2008) o el Huracán César (en julio de 1996). Por lo tanto, la motivación de esta investigación radica en la necesidad que tiene Costa Rica de complementar las herramientas de seguimiento y medición de actividad lluviosa fuerte mediante el uso de imágenes satelitales, debido a la falta de cobertura de estaciones automáticas en múltiples lugares del país; así como en la búsqueda de concretar acciones que ayuden a prevenir situaciones de riesgo para las personas y sus bienes.

En función de lo anterior, se generó un algoritmo que permite localizar y dar seguimiento a las zonas con más alta probabilidad de tener precipitaciones fuertes, particularmente en los lugares en lo que exista carencia de estaciones meteorológicas automáticas. Los eventos de lluvia de esta naturaleza suelen ocasionar inundaciones, deslizamientos, múltiples daños materiales y en los casos más extremos la pérdida de vidas.

Dicha herramienta se desarrolló mediante diversos análisis como el comportamiento de las series de precipitación de algunas estaciones en Costa Rica durante la Tormenta Tropical Nate y la progresión temporal de los canales del GOES-ESTE en dicho evento. Asimismo, se observó la evolución de la serie de tiempo de cada canal respecto a los demás, permitiendo identificar patrones que generaban información relacionada con precipitación severa, ya que es el tipo de lluvia que se desea estudiar. Además, una vez obtenida esta relación, se utilizó en comparaciones con otras estaciones ajenas al estudio, con el fin de verificar en qué medida sus resultados se lograban ajustar a diferentes escenarios.

Se debe resaltar que Costa Rica posee un riesgo importante de afectación por parte de diversos fenómenos hidrometeorológicos, los cuales poseen un impacto negativo en el desarrollo económico, social y cultural del país. Eventos como el Huracán Mitch en 1998 (CEPAL, 1999) y más recientemente el Huracán Otto en 2016 (Informe Estado de la Nación, 2017) y la Tormenta Tropical Nate en 2017 (Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Desastres, 2018), son ejemplos claros que refuerzan dicha afirmación.

Es por esto por lo que la implementación de esta herramienta es muy importante para el desarrollo de las actividades de los meteorólogos operativos en el Instituto Meteorológico

Nacional, debido a la necesidad de informar oportuna y verazmente a las instituciones de protección civil y a la población en general durante eventos de precipitación fuerte.

1.1 Fundamentos de satélites

1.1.1 Satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)

De acuerdo con Suomi y Parent (1968), las observaciones de la Tierra desde una órbita geoestacionaria inician el 6 de diciembre de 1966. Esto se da con el lanzamiento de un sensor experimental (Spin-Scan Cloud Cover Camera) ubicado en el Application Technology Satellite-1 (ATS-1).

Como lo señala Davis (2007), el primer satélite de la serie GOES llamado GOES-1, fue lanzado al espacio en octubre de 1975. A diferencia del ATS-1, el satélite GOES-1 llevaba consigo sensores infrarrojos y visibles, lo cual le permitía a los usuarios realizar vigilancia de la nubosidad en la noche. Los satélites ambientales operacionales geoestacionarios de la serie GOES, se encuentran aproximadamente a 36 mil kilómetros de altitud y su velocidad orbital coincide con la velocidad de rotación terrestre lo que los hace ver estacionarios¹.

Estos satélites son de las herramientas operacionales más importantes para la observación y la vigilancia de las condiciones del tiempo en el planeta. Lo anterior, debido a que permiten determinar la presencia de tiempo severo o alguna condición particular que haga necesaria la emisión de avisos o alertas a la población por medio de la red de información meteorológica para administradores de emergencias (EMWIN por sus siglas en inglés).

Asimismo, la información de dichos satélites también es utilizada para fines de investigación y didácticos. Es importante recordar que estos satélites generan diversos productos meteorológicos de manera continua las 24 horas del día, realizando también observaciones del Sol y del entorno espacial.

En la figura 1 se muestra un esquema aproximado acerca de la órbita de un satélite geoestacionario y otro de órbita polar (que no será analizado en este trabajo).

¹ Fuente: https://www.meted.ucar.edu/goes_r/envmon_es/navmenu.php?tab=1&page=2.0.0&type=flash

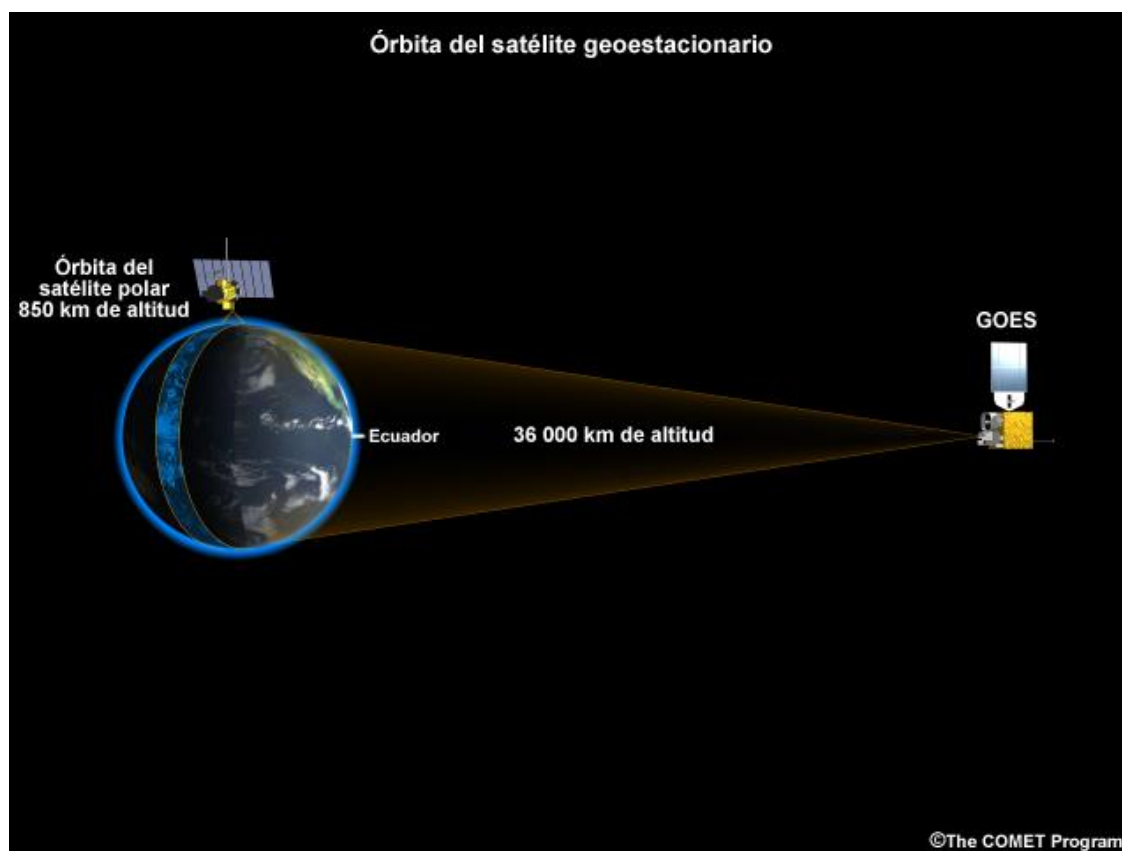


Figura 1. Posición relativa de los satélites de órbita geoestacionaria (GOES) y de órbita polar².

Estos satélites también contribuyen en el desarrollo de operaciones de búsqueda y rescate. Para esto utilizan toda la red de emisores de datos posible, como lo son barcos, aviones, estaciones en tierra, entre otras, mediante el servicio de rastreo asistido por satélite para búsqueda y rescate (SARSAT por sus siglas en inglés)².

Por otra parte, para lugares en los que el satélite se encuentra lejos del cenit local, la nubosidad suele presentar un cierto desplazamiento en relación con la superficie tal como se aprecia en la figura 2. Dicho desplazamiento se conoce como paralaje y es más significativo en los lugares en el perímetro del hemisferio visto por un satélite geoestacionario, en comparación con aquellos en el centro. De esta forma, como se aprecia en la figura anterior, se debe tener en cuenta la gran diferencia de elevaciones entre las nubes que pueden alcanzar

² Fuente: https://www.meted.ucar.edu/goes_r/envmon_es/navmenu.php?tab=1&page=2.0.0&type=flash

alturas de hasta unos 18 km sobre el nivel del mar, mientras que los satélites geoestacionarios orbitan a unos 36 mil kilómetros sobre la superficie de la Tierra.

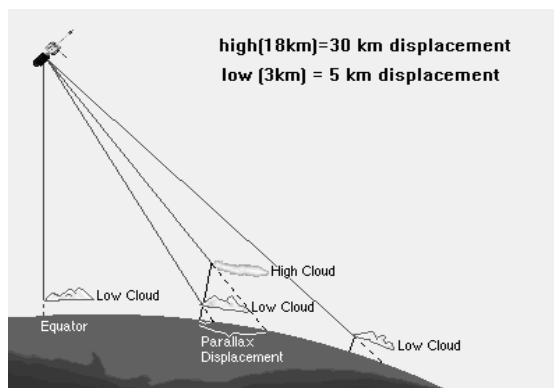


Figura 2. Ilustración del paralaje. Las nubes altas se desplazan más que las nubes bajas. La ilustración que compara las nubes altas con las bajas supone que el satélite está a 52 grados del cenit local³.

En la figura 3 se aprecia la gráfica del desplazamiento normalizado de una nube para una imagen de satélite geoestacionario, debido a movimientos de nubes inducidos por paralaje y su relación con la distancia angular del Nadir (punto opuesto al cenit).

En la misma se puede ver de forma clara, que conforme la latitud se incrementa el desplazamiento normalizado de la nube también aumenta, por lo que el desplazamiento inducido por paralaje también tiende a ser mayor. Finalmente, la dirección de la compensación aparente, por supuesto, está directamente alejada del satélite, a lo largo de un gran arco circular desde el punto subsatelital.

1.1.2 Satélite GOES-ESTE

El satélite GOES-ESTE, inicialmente llamado GOES-R, posee una serie de características muy superiores a las de su antecesor. Estos elementos nuevos, están ligados a los instrumentos que lleva dicho satélite, en primer lugar, presenta el generador avanzado de imágenes base (*Advanced Baseline Imager*, ABI) de 16 canales.

³ Fuente: Tomado y adaptado de <http://www-das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap02/parallax.html>.

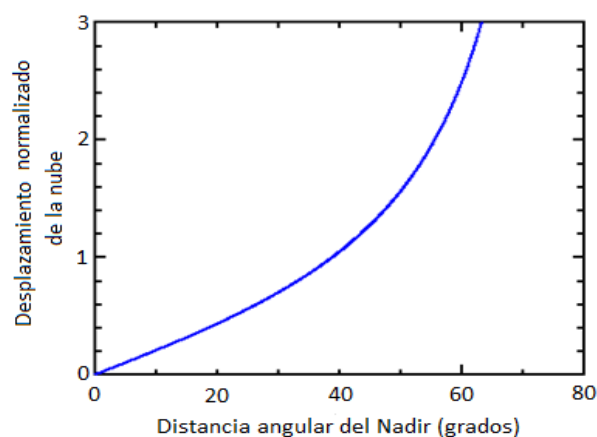


Figura 3. Desplazamiento normalizado de una nube para una imagen de satélite geoestacionario inducidos por paralaje y su relación con la distancia angular en grados desde el Nadir³.

Como se aprecia en la figura 4, este contiene una serie de servicios exclusivos de carga útil (*Unique Payload Services*), que provee el servicio de retransmisión de datos del GOES (*GOES Re-Broadcast*, GRB).

Este transmite datos a los usuarios y posee el servicio de transmisión de información de baja velocidad (*Low Rate Information Transmission*, LRIT), el cual permite proporcionar a los usuarios del sistema información de distintos satélites y otros datos ambientales. Dicha carga útil también posee una red de información meteorológica para administradores de emergencias (*Emergency Managers Weather Information Network*, EMWIN). Este es exclusivamente para el uso de administradores de emergencias, por lo que la información que tendrá disponible irá dirigida a ese fin.

1.1.3 Generador avanzado de imágenes base (*Advanced Baseline Imager*, ABI)

Este sistema de generación de imágenes base, cuenta con una cobertura espectral de 16 canales del espectro electromagnético. Además, incorpora imágenes satelitales a una mayor resolución espacial (entre 500 m y 2 km) y temporal (desde los 15 minutos hasta 30 segundos en áreas reducidas) en la región visible (0.47 y 0.64 μm).

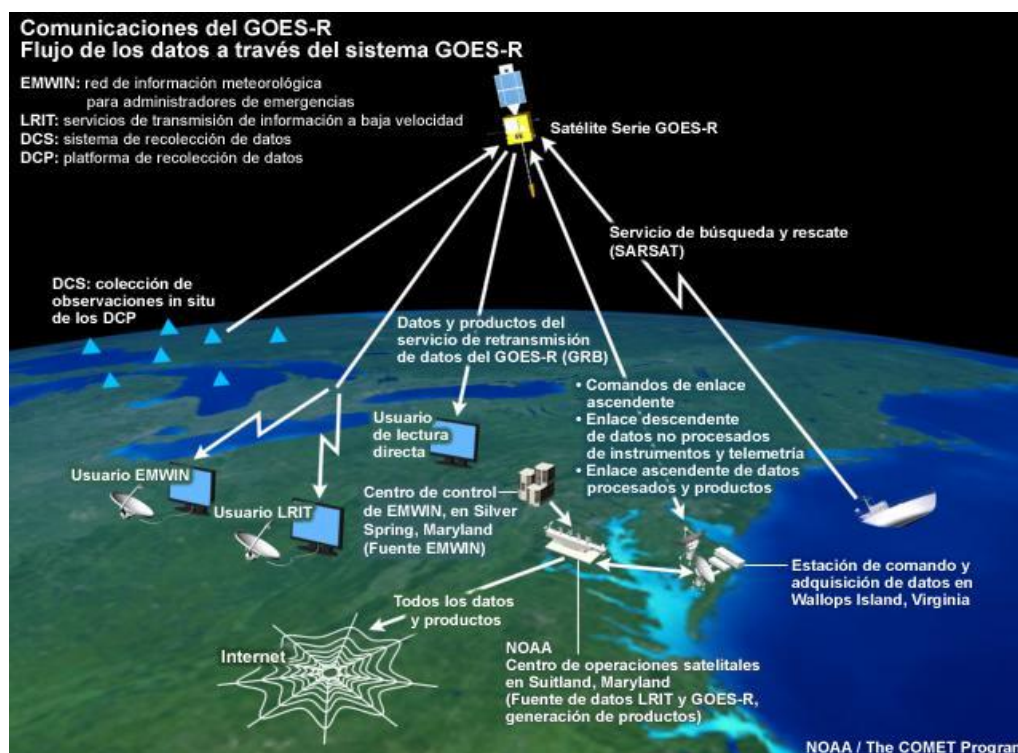


Figura 4. Flujo de información a través del satélite GOES-ESTE (antiguo GOES-R)⁴.

Por otra parte, en la región de los infrarrojos (el canal de $1.37\ \mu\text{m}$ y del 2.2 a $13.3\ \mu\text{m}$), tienen una resolución espacial de $2\ \text{km}$ y una temporal de al menos 15 minutos. De estas, una banda se encuentra en el infrarrojo cercano y once en el infrarrojo, lo cual favorece la gama de posibles usos alrededor de los mismos.

De esta forma, algunos de estos canales, son utilizados en las oficinas de pronóstico para realizar avisos de tiempo severo, modelaje numérico del tiempo y observación de variables ambientales como la temperatura, radiación, el agua precipitable, entre otras.

1.1.4 Bandas del espectro del ABI

Como se mencionó antes, el instrumento ABI del satélite GOES-ESTE posee una serie de canales en el espectro electromagnético entre los 0.47 y $13.3\ \mu\text{m}$. En la figura 5 se aprecia una representación de la posición de cada uno de los 16 canales del GOES-ESTE en el espectro electromagnético.

⁴ Fuente: https://www.meted.ucar.edu/goes_r/envmon_es/navmenu.php?tab=1&page=2.0.0&type=flash.

También se muestra su clasificación, de acuerdo con la región del espectro electromagnético a la que pertenecen, por ejemplo, si son canales de la región visible, infrarrojo cercano o de onda corta, media o larga.

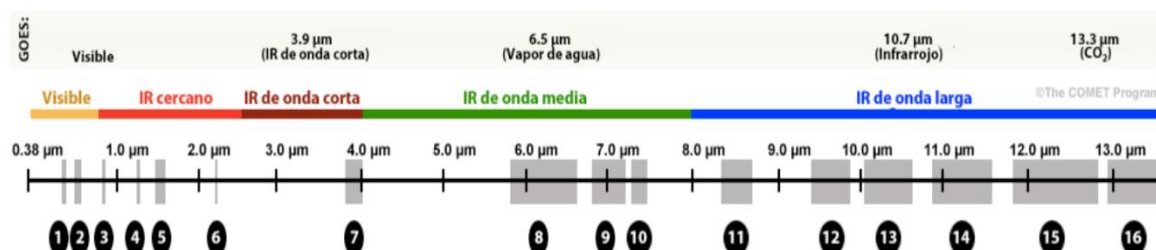


Figura 5. Representación de los 16 canales del GOES-ESTE en el espectro electromagnético, junto con su clasificación de la región del espectro y su longitud de onda⁵.

1.1.4.1 Canales visibles: banda de 0.47 y 0.64 µm

De acuerdo con Schmit et al. (2005), la banda de 0.47 µm o azul, brinda información que se utiliza en el monitoreo de aerosoles (profundidades ópticas de los aerosoles, AOD por sus siglas en inglés) en la atmósfera, lo cual le brinda la capacidad de dar seguimiento a la calidad del aire circundante. Además, brinda observaciones durante el día prácticamente continuas de polvo, neblina, humo y nubes.

Esto para los pronosticadores es de gran importancia, en lo que respecta a diversos temas como seguridad aeronáutica, visibilidad en carreteras o el impacto a la salud de las personas, entre otras. Además, al combinarse esta banda azul con una banda "verde" (que se simulará de otras bandas y/o sensores) y una banda roja (0,64 µm), genera imágenes de "color natural simulado" de la Tierra.

Al mismo tiempo, las mediciones en la banda azul pueden proporcionar estimaciones de visibilidad. La banda de 0,47 µm también se utiliza para desarrollar estudios de contaminación del aire y para el mejoramiento de numerosos productos que dependen de radiaciones de cielo despejado (como productos de superficie terrestre y marina), además, posee otros usos potenciales que se relacionan con las estimaciones de la insolación solar.

⁵ Fuente: https://www.meted.ucar.edu/goes_r/abi_es/explore.htm.

La banda de 0.64 μm o roja, es la segunda banda visible del ABI. Esta banda es utilizada en la detección de niebla, en la estimación de la insolación solar y en la representación de la nubosidad durante el día. Se le conoce como banda roja debido a la posición de esta en la zona roja del espectro visible. Asimismo, esta banda se utiliza en la determinación de la cobertura hielo y nieve, condiciones del tiempo adversas, vientos de poca altura, humo, cenizas volcánicas, análisis de huracanes y de tormentas invernales (Schmit et al., 2005).

En la figura 6 se muestra una gráfica de las bandas espectrales visibles del ABI y gráficos espectrales para algunas superficies.

Un factor de gran relevancia que poseen estos sensores es la resolución espacial, que ayuda en la visualización de nubes convectivas, desde sus etapas iniciales hasta las que poseen un desarrollo maduro. Esto favorece el monitoreo de regiones vulnerables ante posibles eventos severos generados por este tipo de nubosidad (Schmit et al., 2005).

1.1.4.2 Canales IR cercano: bandas de 0.86, 1.37, 1.6 y 2.2 μm

La banda de 0.86 μm se encuentra en una región conocida como infrarrojo cercano o reflectante. Según lo expuesto por Schmit et al., (2005), se utiliza en la detección de nubes diurnas, niebla y aerosoles, así como en la realización de los cálculos de un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), por lo que se le conoce como la banda de “vegetación” o “veggie”. Esta banda del ABI tiene el potencial para detectar patrones de rebrote forestal. Además, dado que la tierra con vegetación, en general, se muestra más brillante en esta banda, se puede utilizar para monitorear la navegación y el registro de imágenes (Schmit et al., 2005).

Otra utilidad mencionada por Schmit et al. (2005), es la de simular la banda “verde” necesaria para una imagen de “color natural” del ABI. Además, se puede utilizar para evaluar las características de la tierra, con el fin de determinar el potencial de incendio e inundación, ya que posterior a un daño fuerte por fuego, la probabilidad de que aumente la escorrentía en el suelo es mayor, propiciando condiciones aptas para inundaciones, deslaves y flujos de material peligrosos.

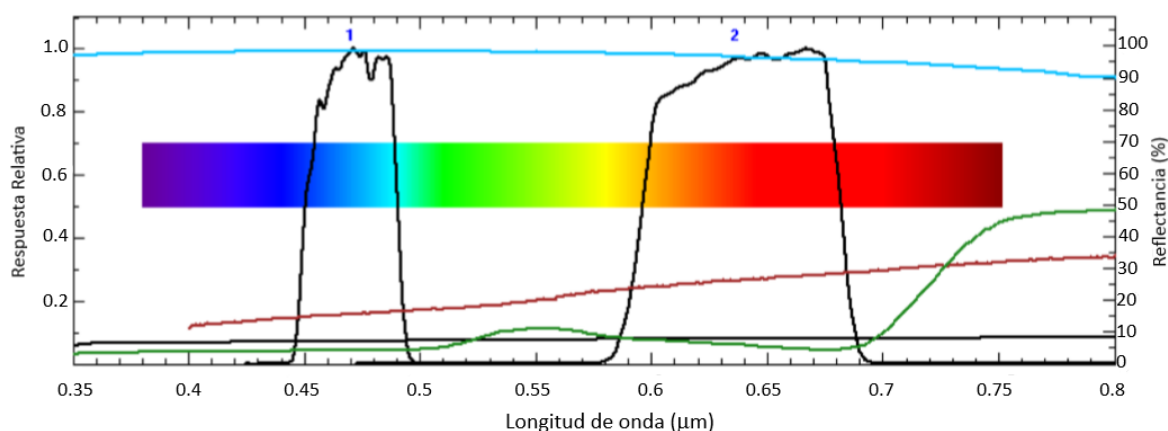


Figura 6. Gráfica de las bandas espectrales visibles del ABI (línea continua negra) y gráficos espectrales para varias superficies (nieve-azul claro, hierba-verde, sucio-marrón, asfalto-negro). Fuente: Tomado y adaptado de GOES-R ABI Fact Sheet Band 1 (“Blue” visible).

Por su parte la banda de 1.37 μm en el infrarrojo cercano, tiene como función principal detectar nubes cirrus muy delgadas en el transcurso del día (Gao et. al, 2002). La misma se localiza en una región del espectro que presenta una fuerte absorción de vapor de agua. Por lo tanto, no detecta la tropósfera inferior, donde existen altas concentraciones de vapor de agua, por lo que proporciona una gran sensibilidad diurna que le permite detectar cirros altos y muy finos, especialmente en condiciones cálidas y húmedas. Al tener la posibilidad de determinar estelas y cirrus delgados, esta banda se puede utilizar en la distinción tanto entre nubes bajas y altas, como entre otros objetos brillantes y nubes altas, en especial cuando se estiman muchos parámetros de superficie (Schmit et al., 2005).

De acuerdo con Hutchinson (1999), la banda de 1.6 μm o de “nieve/hielo” se utiliza en conjunto con otras, para distinguir nubes, hielo y nieve durante en el periodo diurno, en la estimación de la cobertura de nubes, la fase en que se encuentran estas y en la localización de incendios con bajas tasas de combustión.

Además, dicha banda toma ventaja de la discrepancia relativamente grande entre los componentes de refracción de hielo y agua, lo cual hace posible la delineación diurna de la nube de agua/hielo, que de gran utilidad en la generación de rutas para las aeronaves. Por otra parte, durante la noche los fuegos radiantes pueden ser particularmente notables contra el fondo oscuro (Baum et al., 2000).

Según Kaufman et al. (1997), la banda de 2.2 μm en conjunto con otras, permite la estimación del tamaño de las partículas en la nube. Esto es de gran relevancia, ya que el crecimiento de partículas en la nube es un indicador de su desarrollo y la intensidad de estas. Así mismo, esta banda puede ser utilizada en la estimación de partículas de aerosoles, detección de nubes, puntos calientes y nieve. En la figura 7 se muestra una gráfica de la respuesta espectral para las bandas mencionadas, así como las curvas de resolución espectral para algunos materiales, cuyos máximos de reflectancia se asocian a determinadas longitudes de onda.

1.1.4.3 Canal IR de onda corta: banda de 3.9 μm

La banda 7 del satélite GOES-ESTE posee múltiples utilidades. De acuerdo con Ellrod et al. (1998), facilita la identificación de niebla/nubes bajas durante la noche. Asimismo, Prins et al. (1998) mencionan que determinan la presencia de incendios/zonas calientes, erupciones volcánicas y cenizas, así como la detección de hielo y nieve durante el día.

Por otra parte, también es útil en la estimación de vientos en bajo nivel, en el estudio de islas de calor urbanas y su nubosidad; además, ante la componente de sol adicional reflejado durante el día, se presentan temperaturas más cálidas en general en comparación con la noche (Schmit et al., 2005).

1.1.4.4 Canales IR de onda media: bandas de 6.2, 7.0 y 7.3 μm

Una novedad de este satélite es la presentación de tres bandas que dan seguimiento al vapor de agua en niveles bajos, medios y altos de la atmósfera, brindándole herramientas importantes de análisis a los meteorólogos, en especial en el área operativa (Schmit et al., 2005). En la figura 8 se muestran las funciones de respuesta espectral para las tres bandas del vapor de agua del ABI y el espectro de alta resolución emitido por la Tierra. Además, se observan las regiones de caída de la temperatura del espectro debido a la absorción de vapor de agua que se presenta.

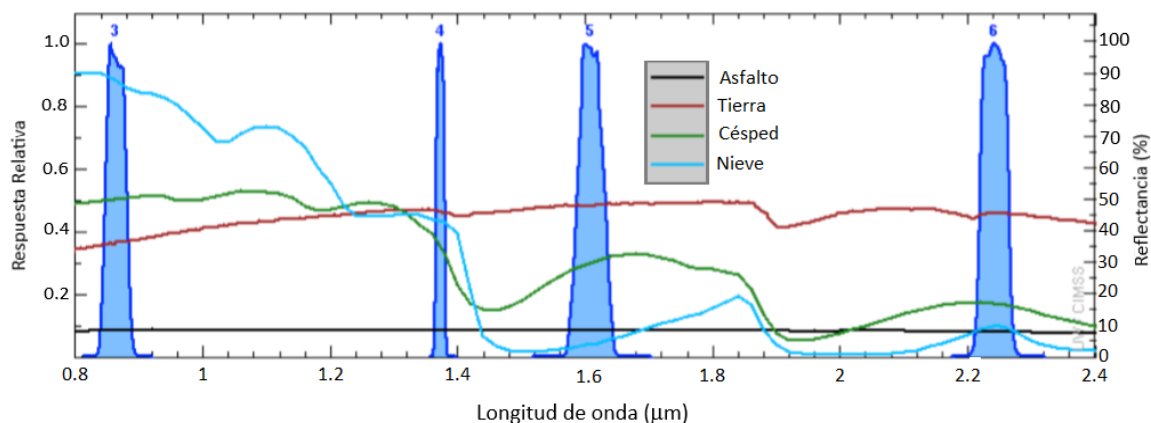


Figura 7. Gráfica de la respuesta espectral ABI (curva sombreada en azul) para las bandas del infrarrojo cercano del ABI, junto con tres curvas de alta resolución espectral. Fuente: Tomado y adaptado de *GOES-R ABI Fact Sheet Band 5 ("Snow/Ice" near-infrared)*.

Las principales diferencias entre estas bandas, radica en los niveles en que estas se desempeñan, por ejemplo, en el caso particular de las bandas de 6.2 y 7.0 μm , muestran las características de la atmósfera en las capas que dependen de la temperatura y la concentración de vapor de agua en la tropósfera alta, en la identificación de corrientes en chorro y el análisis de tiempo severo (Soden y Bretherton 1993; Moody et al. 1999; Weldon y Holmes 1991).

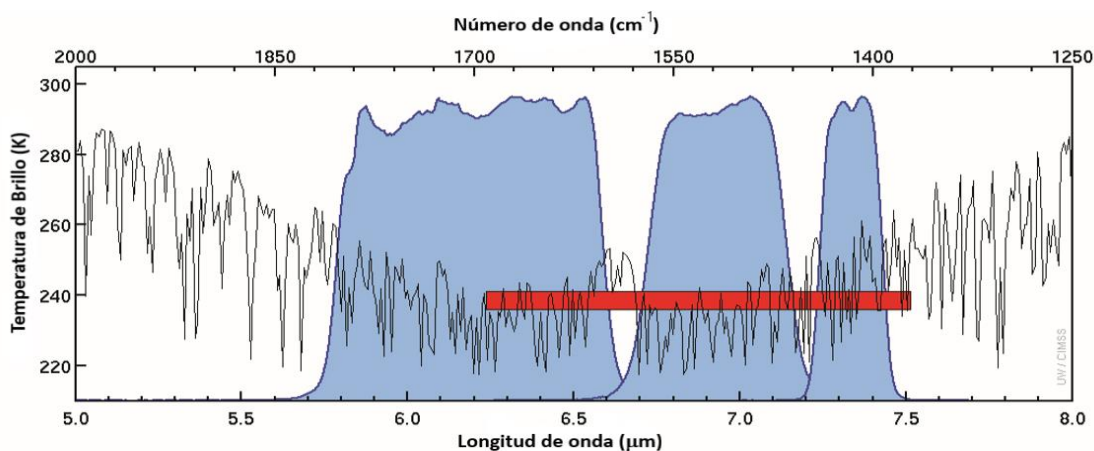


Figura 8. Gráfica de las funciones de temperatura de brillo para las tres bandas de vapor de agua del ABI. El rectángulo rojo indica la región espectral principal de la banda de vapor de agua en satélites previos. La línea negra representa el espectro de alta resolución de la Tierra. Fuente: Tomado y adaptado de *GOES-R ABI Fact Sheet Band 9 ("mid-level water vapor" infrared band)*.

Por otro lado, Schmit et al. (2005), señalan que la banda de 7.3 μm brinda información acerca del comportamiento del viento en los niveles medios e inferiores de la atmósfera y puede ayudar a identificar ráfagas de las corrientes en chorro. Asimismo, Realmuto et al. (1997), mencionan que debido a la absorción de SO_2 , este canal es de gran utilidad para localizar y dar seguimiento a las plumas volcánicas.

1.1.4.5 Canales IR de onda larga: bandas de 8.5, 9.6, 10.3, 11.2, 12.3 y 13.3 μm

De acuerdo con Strabala et al. (1994), la banda de 8.5 μm ha sido utilizada combinándola con las bandas de 11.2 y 12.3 μm para determinar la fase del tope de la nube, con lo que se determinan las propiedades microfísicas de esta. De esta manera, se logra diferenciar las nubes de hielo de las nubes de agua, tanto en el período diurno como en el nocturno, Schmit et al. (2005).

Por otro lado, Realmuto et al. (1997) y Ackerman y Strabala (1994), señalan que estas bandas favorecen la detección de nubes de polvo volcánico, las cuales suelen contener varios tipos de aerosoles y dióxido de azufre. Asimismo, al combinar la banda de 8.5 μm con la de 11.2 μm , se logra detectar cirrus delgados. También, realiza una mejor corrección de la humedad en atmósferas relativamente secas y proporciona un estimado de las propiedades en superficie al combinarse con la banda de 10.3 μm , Schmit et al. (2005).

Por otro lado, Li et al. (2001) y Schmidt et al. (2004), muestran como la banda del ozono o de 9.6 μm , se encarga de generar información en alta resolución espacial y temporal, durante las 24 horas del día, acerca de la dinámica que presenta la atmósfera cercana a la tropopausa. Además, un producto de ozono derivado de la banda de 9.6 μm con estas condiciones de resolución, puede brindar información sobre posible turbulencia de aire claro que es vital en el campo de la aeronáutica, Schmit et al. (2005).

En el caso de la banda de 10.3 μm , esta se conoce como la ventana “limpia” atmosférica del infrarrojo. Según lo menciona Schmidt et al. (2005), esta posee una sensibilidad menor al vapor de agua, lo cual permite mejorar las correcciones de humedad en la atmósfera, la estimación del tamaño de las partículas en la nube y la tipificación de las características de

la superficie. Por su parte, Chung et al. (2000), mostraron la importancia que tiene la región espectral entre los 10-11 μm , para establecer el tamaño de las partículas en las nubes de hielo.

La banda infrarroja de onda larga de 11.2 μm , facilita el desarrollo de los procesos de análisis y predicción por parte de los meteorólogos operativos. De acuerdo con Vincent et al. (1998), dicha banda provee análisis de nubes durante el día y la noche con la finalidad de realizar pronósticos y estimaciones de lluvia, lo que es de suma importancia en el campo operativo de la meteorología. Por su parte, Velden et al. (1998a), señala los análisis de tiempo severo y vientos de deriva como otros factores importantes a considerar por esta banda, así como la fuerza y el análisis de trayectoria de los huracanes (Velden et al. 1998b y Kossin 2002). De acuerdo con Prata (1989), también se favorece la determinación de la altura de los topos de las nubes y la detección de ceniza volcánica.

En lo referente a la banda de 12.3 μm , Davies y Rose (1998), señalan que esta provee el monitoreo de montos de humedad en bajo nivel y de cenizas volcánicas. Por otro lado, Wu et al. (1999), le atribuyen la capacidad de realizar mediciones de la temperatura superficial del mar (TSM), así como la estimación del tamaño de las partículas en las nubes. En la figura 9 se muestra la gráfica de temperatura de brillo de las bandas de onda larga del ABI.

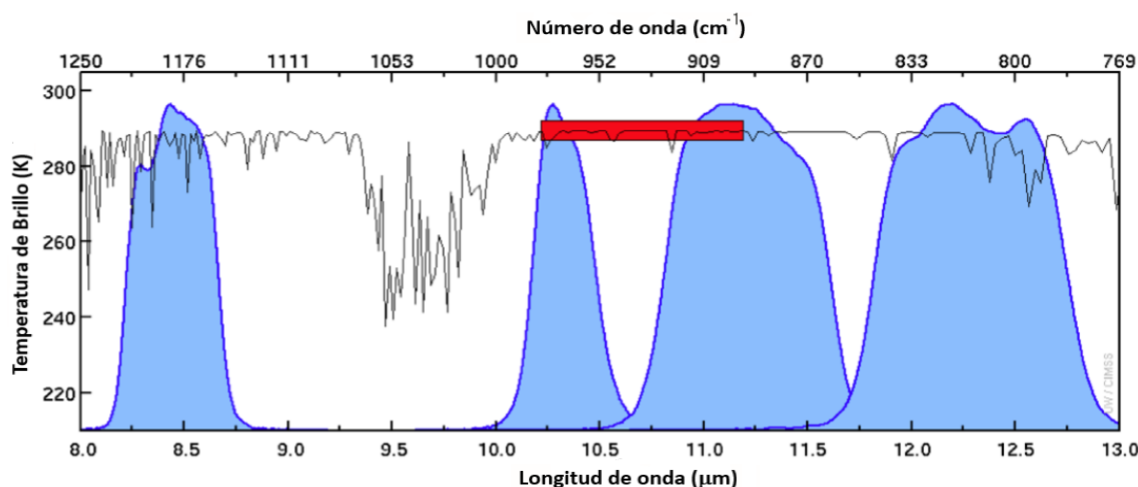


Figura 9. Gráfica de la temperatura de brillo para las bandas de onda larga del ABI. Las curvas azules sólidas representan las funciones de respuesta del instrumento. El rectángulo rojo indica la región espectral donde la mayor parte de la energía es capturada por la banda infrarroja de la ventana de onda larga. La línea negra representa el espectro de alta resolución emitido por la Tierra. Fuente: Tomado y adaptado de *GOES-R ABI Fact Sheet Band 14 (longwave infrared window band)*.

En esta se aprecian las funciones de respuesta del instrumento, el rectángulo rojo la zona de mayor absorción de energía por la región del infrarrojo en la ventana de onda larga, mientras que la línea negra representa el espectro de alta resolución emitido por la Tierra. En este último se notan dos características importantes, que son la absorción de ozono centrada en los 9.7 μm y la absorción debida al vapor de agua.

Lo anterior se reviste de una gran importancia, ya que la presencia de cantidades importantes de polvo (en el caso por ejemplo del flujo de polvo Sahariano) en niveles medios de la atmósfera, es factor determinante para determinar la posible intensificación de los huracanes en la cuenca del Atlántico, Dunion y Velden (2004). De acuerdo con Schreiner et al. (1993) y Wylie and Menzel (1999), la banda de 13.3 μm es usada en el mapeo de la tropopausa, en la estimación de la opacidad y de la elevación de las nubes.

Capítulo 2

2 Marco teórico

En este capítulo se puntualizará en las temáticas relacionadas con el desempeño de los algoritmos de estimación de lluvia utilizando información satelital, con el fin de comprender esos procesos y visualizar su posible implementación.

2.1 Algoritmo de la tasa de lluvia del ABI del GOES-R

A continuación, se describen elementos de gran importancia ligados al funcionamiento de la estimación de lluvia con datos del satélite GOES-R. Kuligowski (2010), describe detalladamente todos los factores que rodean el algoritmo que realiza esta función, las bases físicas y matemáticas, las validaciones, consideraciones prácticas y finalmente algunas suposiciones y limitaciones que este posee. Seguidamente se muestra y describe parcialmente el algoritmo ya que complementa este trabajo.

2.1.1 Descripción general del algoritmo

De acuerdo con Kuligowski (2010), el algoritmo de tasa de precipitación identifica la lluvia de píxeles derivando dichas tasas en un nivel de píxel de las imágenes del ABI. Además, la calibración del algoritmo utiliza coincidencias de los datos ABI con tasas de lluvia que se derivan de microondas. Kuligowski (2010) también menciona que estas son consideradas como las estimaciones más precisas de las tasas de precipitación instantánea disponibles a partir de datos de satélite.

El algoritmo tiene dos etapas para el cálculo de la razón de precipitación. En primer lugar, localiza los píxeles que están experimentando lluvia. Los predictores y coeficientes de predicción para la detección de lluvia, se obtienen por medio de un análisis de zonas de lluvia recuperadas por microondas, que ayuda a discriminar falsos positivos. En una segunda etapa se determinan las tasas de lluvia de los píxeles con precipitación detectada. Mientras que los predictores y coeficientes de predicción son derivados mediante regresión lineal progresiva hacia adelante para recuperar la tasa de lluvia, usando como calibración las tasas de lluvia de microondas obtenidas previamente.

Kuligowski (2010) señala que el algoritmo de tasa de lluvia brinda estimaciones de la tasa de precipitación instantánea a una resolución idéntica a la del píxel del ABI. Además de su uso en la estimación de las tasas de lluvia a partir de los datos ABI actuales, también muestra que las estimaciones se extrapolan en el algoritmo de lluvia del GOES-R en el tiempo, lo cual proporciona información que se utiliza como una entrada para el algoritmo de probabilidad de lluvia.

En cuanto a los datos de sensor primario usados por el algoritmo de tasa de lluvia, Kuligowski (2010) señala que estos brindan información generada a partir de las observaciones del ABI y la información obtenida por geolocalización. Algunos de estos datos son las temperaturas de brillo calibradas y corregidas por paralaje (o radiaciones que luego serán convertidas a temperaturas de brillo) para los canales 8, 10, 11, 14 y 15, entre otras. Kuligowski (2010) también menciona otro tipo de datos llamados auxiliares, los cuales requieren información no incluida en las observaciones del ABI o en los datos de geolocalización.

2.1.2 Calibración del algoritmo

La calibración de cualquier instrumento o proceso es un procedimiento esencial, que debe llevarse a cabo con la finalidad de obtener mediciones que se ajusten a la realidad de los eventos. Con esto se evita la reproducción de información errónea que puede llevar a la toma de decisiones equivocadas, lo cual en el campo operativo es fundamental para la seguridad de las personas y de sus bienes.

De acuerdo con Kuligowski (2010), para calibrar el algoritmo se necesita información de las tasas de precipitación obtenidas a partir de los datos de microondas. Estas tasas de lluvia son adquiridas mediante un producto operacional del Servicio Nacional de Satélites Ambientales, Datos e Información (NESDIS, por sus siglas en inglés) “Blended Microwave Rainfall Rate”. El producto realiza composiciones de tasas de lluvia y distribuciones estadísticas de varias fuentes como SSMIS, AMSU-B/MHS con el fin de solventar posibles fragilidades entre estos. Luego, se combinan las tasas mencionadas con los predictores derivados del ABI. Además, se cuenta con coeficientes de calibración que son utilizados en la clasificación de la precipitación y en la determinación de si se tiene lluvia o no.

La calibración del algoritmo ya mencionado es una etapa fundamental para el desempeño adecuado de las estimaciones satelitales de lluvia, tanto en su ocurrencia como en su intensidad. Para desarrollar dicha calibración pueden utilizarse datos de estaciones meteorológicas o incluso de radar, únicamente se requiere que dichos instrumentos generen tasas instantáneas de precipitación y no acumulados necesariamente, debido a que el algoritmo estima precisamente tasas de lluvia.

Otro elemento primordial en el proceso de calibración es la concurrencia de tiempo entre los predictores ABI y las tasas de lluvia de microondas. Además, Kuligowski (2010) menciona que el desempeño del algoritmo mejora si la información es dividida en clases que se pueden extraer directamente de los datos disponibles. Así, los datos se han dividido en cuatro regiones de acuerdo con la latitud, una de los 60°S-30°S, otra de los 30°S-Ecuador, una más del Ecuador-30°N y una última de 30°N-60°N.

2.2 Microondas por encima de visible o infrarrojo

De acuerdo con Kuligowski (2010), las tasas de lluvia en las nubes que poseen un grosor bastante amplio desde el punto de vista óptico son difíciles de capturar mediante el uso de longitudes de onda visibles e infrarrojas; mientras que la respuesta obtenida en la región de las microondas en el espectro electromagnético posee mucha más validez. Lo anterior debido a que las nubes de lluvia no son tan gruesas ópticamente en esa región del espectro, por lo que las señales de microondas detectan mejor los movimientos del agua o del hielo en la nube.

2.2.1 Tipos de precipitación

Kuligowski (2010), proporciona una clasificación de tres tipos de lluvia acordes a las temperaturas de brillo del ABI que se toman del conjunto de datos coincidentes de microondas-ABI. Para diferencias la clasificación que se le da a los tipos de lluvia se utilizó la letra T que hace referencia a la temperatura de brillo a una determinada longitud de onda a la que corresponde un canal del satélite, que en este caso es indicado por el subíndice “x”, por lo tanto, T_{10} sería la temperatura de brillo en el canal 10.

Al tipo 1 se le llama “nube de agua” que se da en casos en que $T_{10} < T_{14}$ y $T_{11} - T_{14} < -0.3$, al tipo 2 se le llamó “nube de hielo” y se da si $T_{10} < T_{14}$ y $T_{11} - T_{14} \geq -0.3$ y al tipo 3 se le llamó “nube convectiva de tope frío” la cual se da cuando $T_{10} \geq T_{14}$. Como se observa, las bandas usadas en todas las relaciones señaladas pertenecen a la región infrarroja del espectro (canales 10, 11 y 14), y es debido a que la relación entre estas y las tasas de lluvia permitió definir los tipos de precipitación mencionados, esto ya que muestran sensibilidad a las temperaturas de la nube.

Como se observará en las secciones 4.2.1 y 4.2.2, los canales seleccionados para desarrollar el producto de esta investigación son el canal 12 y el canal 15. Lo anterior es bastante relevante ya que son canales que no son tomados en cuenta por Kuligowski en su producto, pero que si fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo.

2.2.2 Precipitación

En lo referente a la lluvia, la principal finalidad del algoritmo es realizar una distinción entre píxeles de cielo claro o nublado sin lluvias, y los que sí poseen lluvia. De esta forma, mediante un análisis discriminativo, el algoritmo realiza una separación de cada tipo de nube, en cuyo caso se aplica un predictor binario, donde se utiliza el valor 1 en caso de que la tasa de lluvia de microondas supere 1.0 mm/h, en caso contrario se le asigna el valor 0.

Dicho umbral de razón de precipitación se utiliza debido a la existencia de marcadas diferencias en los instrumentos de microondas en cuanto a la sensibilidad a la llovizna y a la lluvia muy ligera. Luego, se realizan una serie de cálculos por parte del algoritmo para determinar una ecuación que relacione uno o dos predictores, sumado a un valor de umbral por encima del que se considera que en dicho píxel.

2.2.3 Pronóstico de tasas de precipitación

Una vez que el algoritmo realiza los procesos para comprobar la existencia de lluvia en determinados píxeles de la imagen satelital, el siguiente paso es establecer las tasas de precipitación para dichos píxeles. Como señala Kuligowski (2010), la relación entre muchos de los predictores y las tasas de lluvia no es lineal, por lo que es necesario complementar el

conjunto de predictores con otro grupo distinto de estos, mediante la aplicación de transformaciones no lineales del conjunto original.

Una vez que se obtiene el conjunto de predictores transformados, los mismos se evalúan mediante regresión lineal frente a las tasas de lluvia esperadas con regresiones exclusivas para cada clase de algoritmo. Posteriormente, se realiza un proceso en el que se toma el predictor con la mejor correlación con las tasas de lluvia esperadas relacionándolo después con cada uno de los predictores restantes y se escoge la combinación que genera la mejor correlación con los datos esperados.

2.3 Validación de datos de salida de algunos algoritmos de tasas de lluvia

Ebert y Manton (1998), realizaron una evaluación de cincuenta algoritmos de lluvia satelital sobre una región cuadrada de 5° sobre el Océano Pacífico Oriental Ecuatorial (también llamada “piscina cálida” del Pacífico) durante el Programa “Tropical Ocean-Global Atmosphere, Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (TOGA COARE)” entre los meses de noviembre de 1992 y febrero de 1993. Los algoritmos satelitales usaron datos GSM (Geostationary Meteorological Satellite) VIS/IR (Visible/Infrared), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) para la estimación de lluvia a escala mensual e instantánea, mientras que los datos de calibración se tomaron de mediciones de radares Doppler cada diez minutos.

Ebert y Manton (1998), señalan que la mayoría de las estimaciones de lluvia por parte de los algoritmos del satélite eran mayores a las de los radares (alrededor de un 30%), además mencionan que estos algoritmos tienden a sobreestimar montos de lluvia durante eventos severos de precipitación. Luego, a escalas mensuales, al utilizar datos geoestacionarios (IR, VIS/IR, y mezclas IR-SSM/I), las correlaciones con la información de radar mejoraron, alcanzando casi 0.86-0.90, lo cual, es resultado del uso de datos con una mayor resolución espacial y temporal. Además, dichos autores mencionan que los modelos de PNT (Predicción Numérica del Tiempo) sobreestimaron la lluvia mensual durante AIP-3 (Algorithm Intercomparison Projects).

Sohn et al. (2009), llevaron a cabo una validación de productos satelitales de lluvia de alta resolución en la Península Coreana mediante el uso de una densa red pluviométrica. A estos productos se les llamó HRPPs (High-Resolution Precipitation Products), los cuales poseían una resolución espacial de 0.25° y una temporal de tres horas. A partir de lo anterior se desarrollaron cuatro productos: el TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis), el CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Method), el PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks) y el NRL-Blended (National Research Laboratory) con datos de precipitación mezclados. La validación de estos algoritmos se dio mediante la comparación de los datos brindados por estos productos y los datos recabados en estaciones automáticas en superficie con espacios de unos 15 km entre ellas (con datos de un minuto de resolución temporal), esto durante las temporadas de verano entre los años 2003 y 2006.

Aunado a lo anterior Sohn et al. (2009), mostraron que el comportamiento general desde el punto de vista estadístico de CMORPH, PERSIANN y NRL-blended son similares en muchos aspectos, lo cual se da debido a que en estos algoritmos se utiliza como referencia el p-microondas-estimado de lluvia, que es un método que parece subestimar en gran manera la tasa de lluvia en la Península Coreana. PERSIANN tiene un desenvolvimiento deficiente, lo que hizo inferir a los autores que la utilización de un algoritmo global o regional puede no tener un desempeño apropiado en áreas locales. En el caso de CMORPH, este parece generar una distribución de la lluvia acorde con el estimado de p-microondas y muestra la más alta correlación y probabilidad de detección de lluvia al compararlo con las mediciones de las estaciones automáticas.

Al igual que lo observado en este estudio de Sohn et al. (2009), varias investigaciones (Gottschalck et al. 2005; Ebert et al. 2007; Tian et al. 2007; Sapiiano and Arkin 2009) realizadas mediante el PEHRPP (Program to Evaluate High Resolution Precipitation Product) en otras partes del planeta, han mostrado que los algoritmos estiman mejor la lluvia convectiva durante el verano. De acuerdo con Ebert et al. (2007), se dieron evaluaciones de algunos datos de HRPP (High Resolution Precipitation Product) sobre Australia, demostrando además que las estimaciones de lluvia satelital muestran mejores resultados en

los trópicos y en latitudes medias, lo cual difiere en los lapsos invernales en los que se presentan subestimaciones de una significancia importante que se da ante la dificultad para detectar lluvias convectivas.

Asimismo, Gottschalk et al. (2005), Ebert et al. (2007), Tian et al. (2007) y Sapiano y Arkin (2009), determinaron condiciones similares a las de Australia en los Estados Unidos, con un mejor desempeño en la estimación de las lluvias en el verano y mayores inconvenientes en la detección de las precipitaciones en los periodos invernales. De acuerdo con Sapiano y Arkin (2009), en el Océano Pacífico Tropical se presenta una subestimación de las lluvias por parte de los satélites, al comparar los datos del pluviómetro de una boya amarrada. Un ejemplo de estos se da en las Islas Japonesas donde los HRPP tuvieron un mal desempeño tanto para la lluvia ligera como para la lluvia intensa durante la época de verano, generando importantes subestimaciones (Kubota et al., 2009). Por ende, se observa como la calidad de la precipitación determinada por satélite posee una alta dependencia del régimen de lluvia o de la temporada en que esta se presente.

2.4 Uso de imágenes satelitales para detección de lluvia severa

Las precipitaciones fuertes e intensas suelen generar inundaciones repentinas, las cuales afectan a gran cantidad de personas en gran parte del planeta. Por lo tanto, el desarrollo de herramientas que permitan detectar este tipo de eventos, posee una gran importancia para la comunidad científica y en particular a los profesionales del área operativa que suelen tener la responsabilidad de prevenir a las organizaciones de protección civil y a la población en general, en particular en sitios donde no existe cobertura por parte de radares meteorológicos (Bedka, K., Murillo, E. M., Homeyer, C. R., Scarino, B., y Mersiovsky, H., 2018).

De acuerdo con Bedka et al. (2018), los satélites geoestacionarios brindan información sobre observaciones en diversas bandas del espectro electromagnético sobre tormentas convectivas severas en todo el mundo. Cintineo et al. (2013), señalan que un enfriamiento rápido en el tope de la nube es un elemento esencial en el proceso de formación de una tormenta severa.

Por su parte, varios autores (Dworak et al. 2012; Bedka and Khlopenkov 2016) llevaron a cabo estudios de la relación entre los casos en los que se aprecia un “overshooting-top (OT)” (que es un término que es utilizado para indicar cuando se tiene una protuberancia en forma de cúpula que sobresale de la parte superior de un yunque de una nube de tormenta⁶) y eventos meteorológicos severos. Dworak et al. (2012), utilizaron datos de temperatura de brillo de la ventana del infrarrojo del satélite GOES 12 para detectar OT y compararon dichas detecciones con datos de radar, los informes de tormentas severas y las advertencias de clima severo en el este de los Estados Unidos, encontrando que valores de temperatura menores a 200 K, junto con la presencia de OT, suelen ser indicadores precisos de actividad convectiva severa. Negri y Adler (1981) realizaron estudios de OT para el caso de precipitación fuerte, mientras tanto Heymsfield et al. (1991) lo llevaron a cabo para observar su relación con vientos dañinos. Reynolds (1980) lo hizo para estudiar granizos de gran tamaño, mientras que Heymsfield y Blackmer (1988), Fujita (1989) y Kellenbenz et al. (2007), lo hicieron para estudiar su relación con los tornados.

Más recientemente Bedka y Khlopenkov (2016), desarrollaron una metodología utilizando un nuevo enfoque de detección multispectral de OT al incorporar imágenes visibles de muy alta resolución a los análisis, evitando el uso de criterios fijos y agregando análisis de patrones que permiten obtener un producto de probabilidad de OT, alcanzando resultados muy favorables de detección falsa.

Bedka et al. (2018), menciona otro factor que se considera dentro de los toques de las nubes convectivas, que es la presencia de las gotas de agua o de cristales de hielo anormalmente pequeños dentro de un conjunto de cúmulos en desarrollo y dentro de yunques, situación que fue investigada a fondo por Lindsey et al. (2006) y Rosenfeld et al. (2008). Por otra parte, Apke et al. (2016) y Apke (2018), analizaron flujos divergentes en los toques de los cúmulos, lo cual es otro importante patrón de actividad convectiva fuerte.

Asimismo, se ha estudiado el movimiento anómalo de una tormenta en relación con otras tormentas cercanas, lo que de acuerdo con Lindsey y Bunkers (2005), es un fuerte indicador

⁶ Fuente: https://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT_2042700.html

de que pueda presentarse una corriente ascendente y supercélula giratoria, favoreciendo los desarrollos de tormentas severas.

Como se verá en los capítulos 4 y 5 de este trabajo, lo anterior fue de mucha importancia ya que brindó un sustento teórico clave para el desarrollo de un producto que permita la detección de zonas con precipitación intensa.

Capítulo 3

3 Metodología

En este capítulo se muestran las fuentes de datos tanto terrestres como del satélite y también el procedimiento que se siguió para el desarrollo de la investigación. Los datos de las estaciones meteorológicas corresponden a información obtenida mediante pluviómetros, mientras que la información satelital de cada uno de los 16 canales que este posee es obtenida a través de los sensores incorporados en el mismo.

3.1 Recolección y análisis de la información

3.1.1 Fuentes terrestres

En este estudio se utilizaron datos de registros de cada minuto de la estación de la Universidad de Costa Rica en Santa Cruz de Guanacaste y una base de datos de registros de cada minuto que comprende a estaciones del Instituto Meteorológico Nacional. Estas últimas se encuentran ubicadas en distintos puntos de Costa Rica y estuvieron funcionando continuamente en el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017, periodo que comprende los días previos a la afectación por parte de la Tormenta Tropical Nate en el país, los días de mayor afectación y el día posterior al paso de dicha tormenta tropical.

En el cuadro 1 se enumeran algunas características de las estaciones utilizadas en este análisis, como lo son el nombre de la estación, su localización geográfica y su elevación.

Cuadro 1. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas. Fuentes: UCR e IMN.

Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m.)
Santa Rosa	10.84005	-85.61746	315
Santa Cruz	10.28266	-85.59684	50
Palo Verde	10.34667	-85.35064	9
Cerro de la Muerte	09.56053	-83.75360	3400
Universidad para la Paz	09.92036	-84.27292	825
EARTH	10.21278	-83.59455	30

En la figura 10 se muestra la localización geográfica de las estaciones utilizadas para el estudio.

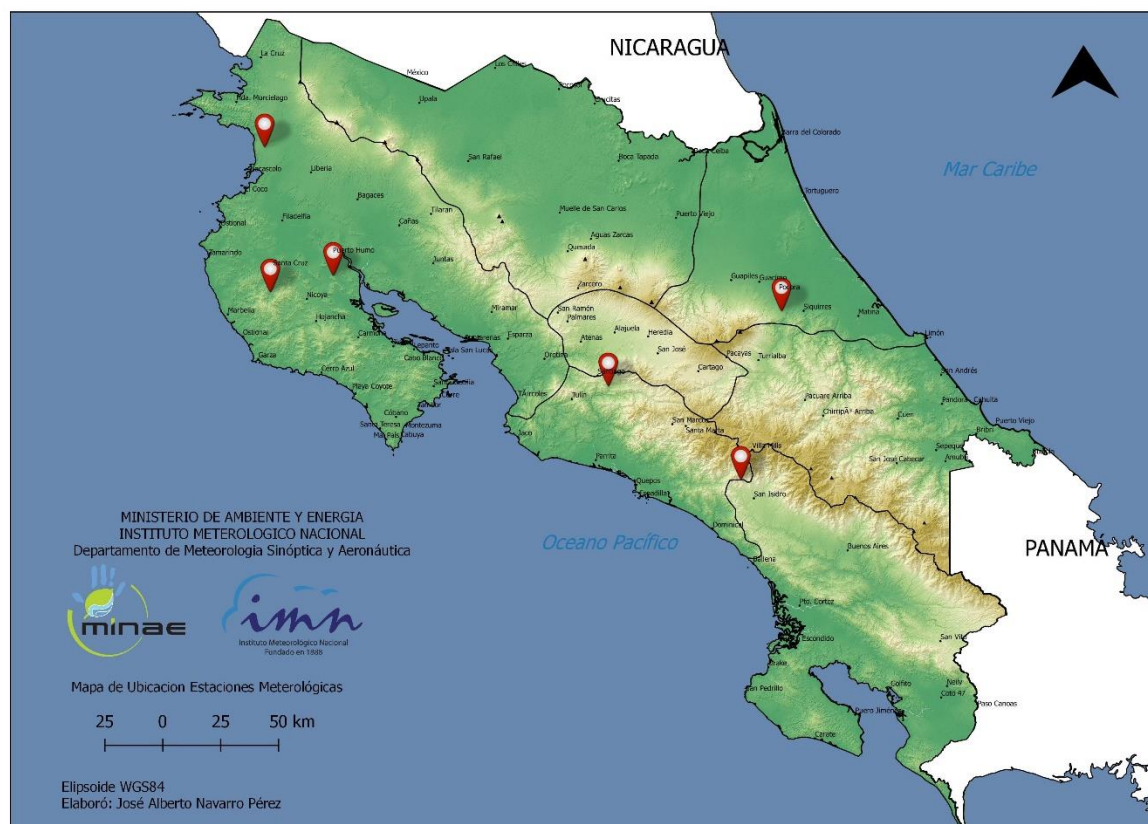


Figura 10. Mapa de Costa Rica con la posición geográfica de las estaciones utilizadas en la investigación. Fuente: IMN-DMSA.

3.1.2 Fuentes satelitales

La información utilizada corresponde a imágenes del satélite GOES-ESTE. Estas fueron obtenidas de las bases de datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Big Data Project)⁷. Para esta investigación se utilizaron todas las imágenes satelitales disponibles, comprendidas en intervalos de 15 minutos, durante las 24 horas del día, en los 16 canales del satélite GOES-ESTE. Las imágenes utilizadas se encuentran en el periodo entre el 2 y el 6 de octubre del año 2017.

⁷ <https://www.noaa.gov/big-data-project>

3.2 Procedimiento

En primer lugar, se debe mencionar que el procesamiento de toda la información utilizada en este trabajo de investigación se realizó con ayuda del lenguaje de programación Python. Esto debido a que la cantidad de datos utilizados requirió de una herramienta con una alta capacidad para manejar archivos de gran tamaño como los obtenidos de las imágenes satelitales o de las estaciones meteorológicas con una alta resolución temporal.

Por lo tanto, mediante el uso de los archivos de las imágenes del satélite GOES-ESTE, se realizó una normalización de los datos para cada uno de los canales del satélite, con el fin de facilitar la visualización de las variaciones de los valores de brillo relativo o de la temperatura de brillo (dependiendo del canal que se analizara) de manera uniforme y para evitar problemas de escala de las variables. Se debe mencionar que, en esta etapa de la investigación, se contó con el apoyo de un asistente para la generación de estos productos.

De esta forma, utilizando la localización geográfica de las estaciones meteorológicas automáticas, se graficaron las series de tiempo normalizadas de los 16 canales del satélite GOES-ESTE y de los datos de lluvia obtenidos en las estaciones automáticas disponibles para el estudio. Esto se realizó con la finalidad de observar su evolución desde momentos previos al evento extremo de precipitación, durante el mismo y posterior a este. En la figura 11 se aprecia una muestra de las gráficas mencionadas, en la que el dato de lluvia normalizada se indica con las líneas celestes, mientras que las líneas naranja, verde y roja representan a los canales 1, 2 y 3 respectivamente.

En las gráficas similares a la anterior (ver Anexo 1 para observar las demás gráficas), se agruparon la lluvia y los canales que tuviesen características similares obteniéndose un total de 5 gráficas por estación. De esta forma, se agruparon los canales 1, 2 y 3; el 4, 5 y 6; el 7, 8 y 9; el 10 y 11; y del 12 al 16. Luego, se llevó a cabo una inspección visual, para determinar patrones de comportamiento de las series de tiempo a lo largo del evento extremo de precipitación, así como en sus horas previas y posteriores. Una vez realizado este estudio, se logró determinar algunas consideraciones al respecto, las cuales fueron de suma importancia en el desarrollo del algoritmo de detección de eventos intensos de lluvia, las cuales se describen en el capítulo 4.

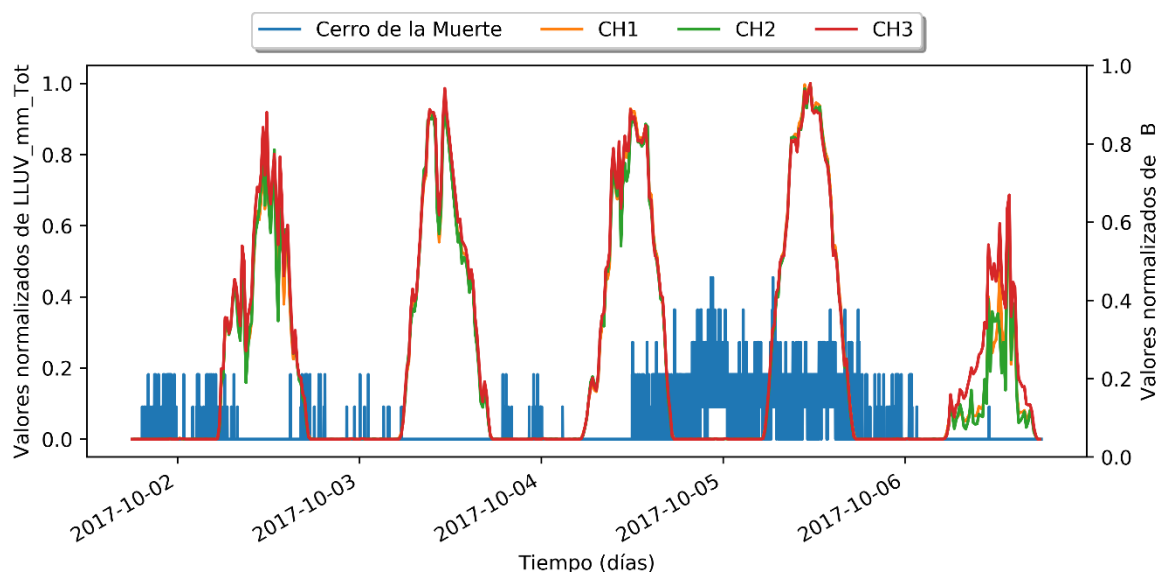


Figura 11. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y del brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

Posteriormente, se utilizaron las imágenes satelitales de alta resolución generadas durante el periodo entre el 2 y 6 de octubre del año 2017, que abarca los días en los que la Tormenta Tropical Nate tuvo una influencia significativa en Costa Rica, así como días previos y posteriores a la afectación de dicha tormenta, ya que la mayor influencia de esta se presentó los días 4 y 5.

Debido a la gran cantidad de imágenes disponibles, se decidió realizar “loops” de estas con la finalidad de observar la evolución en el tiempo de dicha tormenta y de los momentos en que se presentaron mayores afectaciones en el país. A partir de lo anterior, se decidió llevar el análisis a un nivel más preciso, por lo que se realizaron aproximaciones progresivas las cuales se muestran en la figura 12.

Dichas aproximaciones alcanzaron cuatro niveles de acercamiento, en las localizaciones de todas las estaciones meteorológicas automáticas, durante los lapsos en los que se presentó precipitación intensa.

3.2.1 Algoritmo, ¿cómo se hizo?

Partiendo de la información obtenida en las fases iniciales de la investigación, se generó un algoritmo para facilitar la creación de un producto que resalte en las imágenes de satélite,

las zonas con mayor probabilidad de presentar precipitación intensa. Este algoritmo surge a partir de la realización de un análisis del comportamiento de la temperatura de brillo (o del brillo relativo dependiendo del canal que se analizara) de dichos canales.

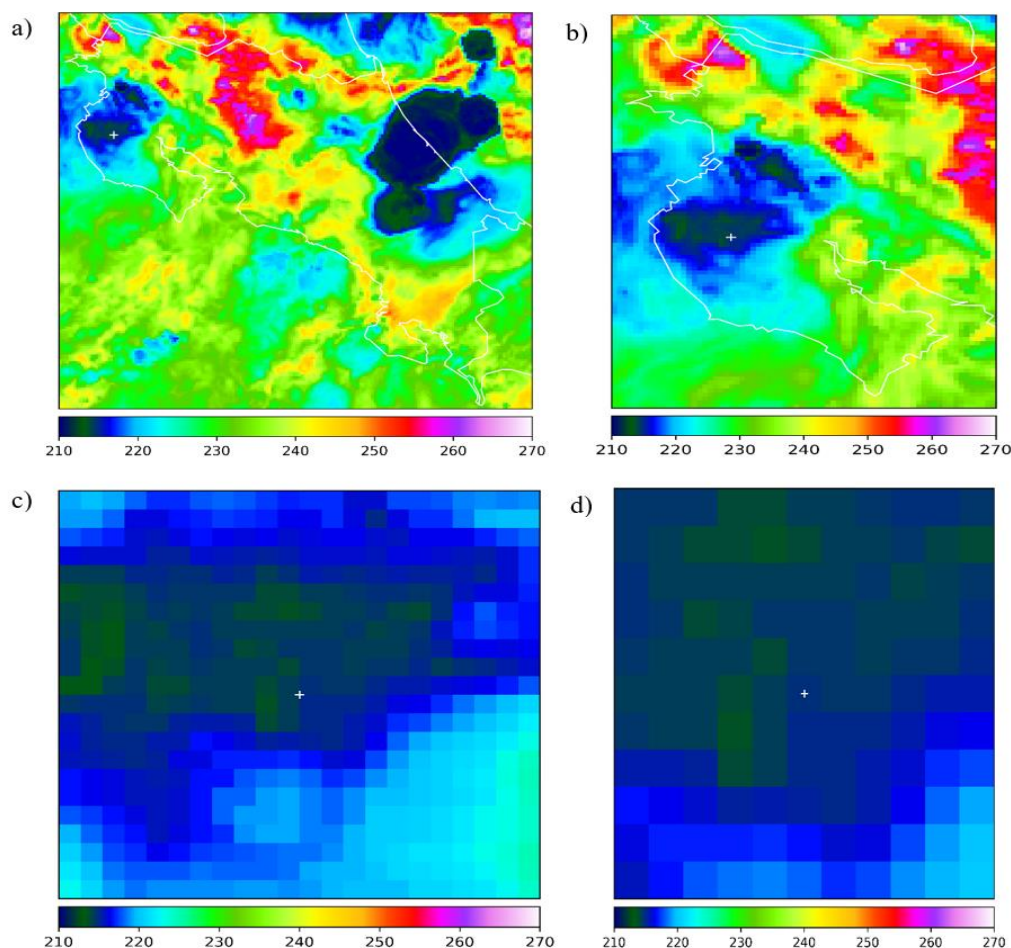


Figura 12. Aproximaciones progresivas sobre la estación meteorológica automática en Santa Cruz durante el periodo de afectación de la tormenta tropical Nate para el día 4 de octubre a las 5 pm hora de Costa Rica. La imagen a) muestra las condiciones predominantes en todo el país, la imagen b) se concentró en Guanacaste, la c) en el pueblo de Santa Cruz y la d) sobre la estación.

En el capítulo 4 de esta investigación se detallan varias figuras que ilustran la relación existente entre los canales del satélite GOES-ESTE con los datos de lluvia obtenidos por las estaciones meteorológicas durante el periodo de interés de esta investigación.

En la sección 4.1 de este trabajo, se desarrolla un recuento de todas las comparaciones realizadas entre los datos de lluvia de las estaciones automáticas y los canales del satélite

GOES-ESTE. En estos se presentan algunas figuras que sirven de muestra del trabajo investigativo que se llevó a cabo. La totalidad de las figuras que muestran las relaciones de todas las estaciones automáticas con todos los canales del GOES-ESTE se pueden consultar en el Anexo 2.

En resumen, los análisis mencionados mostraron que los canales 1, 2 y 3 no presentaron variaciones importantes en el comportamiento de los valores de brillo relativo durante los eventos de lluvia intensa. En cuanto al comportamiento de los canales 4, 5 y 6, estos dejaron ver variaciones notables de los valores de brillo, relacionados a los cambios en la intensidad de las lluvias durante los eventos extremos. En lo que respecta al proceder de los canales 7, 8 y 9, estos revelaron variaciones notables de los valores de temperatura de brillo, en especial el sensor del canal 7, ya que los otros dos muestran poca variación entre ellos. Por otra parte, los canales 10 y 11 presentaron una tendencia bastante similar a los canales del 7 al 9, generando mínimos de temperatura de brillo muy similares durante los eventos intensos de precipitación. Finalmente, en el análisis de los canales del 12 al 16 se observó como indicador más relevante, una diferencia de temperatura de brillo entre los canales 12 y 15 cercana a los 13 K durante los eventos de lluvia intensa.

De esta manera, una vez analizados todos los canales y la lluvia de cada una de las estaciones, se logró determinar patrones en dichas observaciones, los cuales sugerían la realización de algunos cálculos entre los canales, lo cual se puede apreciar en la sección 4.2 de esta investigación. Lo anterior, mostró el camino a seguir para llevar a cabo la construcción del algoritmo. Por lo tanto, se realizaron operaciones de resta del canal 6 menos el canal 5, del canal 4 menos el canal 5 y del canal 12 menos el canal 15, limitando dichos resultados a ciertos umbrales que cumplan con lo observado en las figuras de la sección 4.1.

Dichos análisis arrojaron resultados acordes con el objetivo primordial, que es la detección de lugares con actividad lluviosa fuerte e intensa, así como el seguimiento de estas tormentas mediante el uso del producto satelital. A partir de lo anterior, se utiliza el algoritmo generado por los canales 12 y 15 del satélite GOES-ESTE para la creación del producto derivado para la localización de núcleos con precipitación intensa, y que de paso sirve perfectamente para dar cobertura a tormentas eléctricas y posible granizo.

Capítulo 4

4 Análisis de datos

En este capítulo se presentan los datos e imágenes obtenidos durante la investigación. En primer lugar, se muestran las series de tiempo de lluvia de las estaciones meteorológicas seleccionadas (Santa Cruz, Santa Rosa, Palo Verde, Cerro de la Muerte, Universidad para la Paz y la EARTH) y los valores de brillo relativo o temperatura de brillo de los diferentes canales del GOES-ESTE, todo esto para el período de influencia de la Tormenta Tropical Nate en Costa Rica.

Posteriormente, a partir de las relaciones obtenidas entre las series de tiempo de lluvia y las variables de los sensores del GOES, se realizaron propuestas de algoritmos y se eligió el más adecuado a las necesidades de la investigación. Asimismo, se muestran imágenes de algunos canales que fueron utilizados en el desarrollo de los algoritmos.

4.1 Serie de tiempo de lluvia y los canales del GOES

La comparación entre las series de tiempo de lluvia fue parte fundamental de esta investigación. La resolución temporal de los datos de lluvia utilizados fue de un minuto, mientras que la resolución temporal de los datos de las imágenes satelitales fue de 15 minutos. Esto debido a que la construcción del algoritmo de seguimiento de precipitaciones severas proviene en gran medida de este análisis. A continuación, se presentan los resultados y las discusiones correspondientes a las comparaciones entre algunas de las estaciones analizadas y las series de tiempo de los canales del GOES.

4.1.1 Comparación entre la lluvia y los canales 1, 2 y 3

En la figura 13 se aprecia la serie de tiempo de precipitación en la estación del Cerro de la Muerte, y el brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE. Se debe mencionar que este mismo producto fue generado en todos los puntos mencionados en el cuadro 1 del capítulo 3.

Al realizar una observación minuciosa de dicha figura, no se logra apreciar variaciones en el comportamiento de las series de tiempo de los canales, para los diferentes momentos en los que se recopilaron los datos. Las variaciones de intensidad de lluvia en todos los casos no

se ven reflejadas en variaciones de los valores de brillo relativo de estos canales entre sí, es decir que no se observa un distanciamiento o separación de los valores de brillo relativo de estos canales durante los eventos de lluvia intensa, que sugiera alguna influencia de esta precipitación en los valores de brillo relativo.

Este comportamiento fue similar al de las otras localizaciones en las que se realizaron las mediciones tanto del satélite como de los pluviómetros. Además, debido a que estos canales son generados por el Sol su uso durante la noche no es posible.

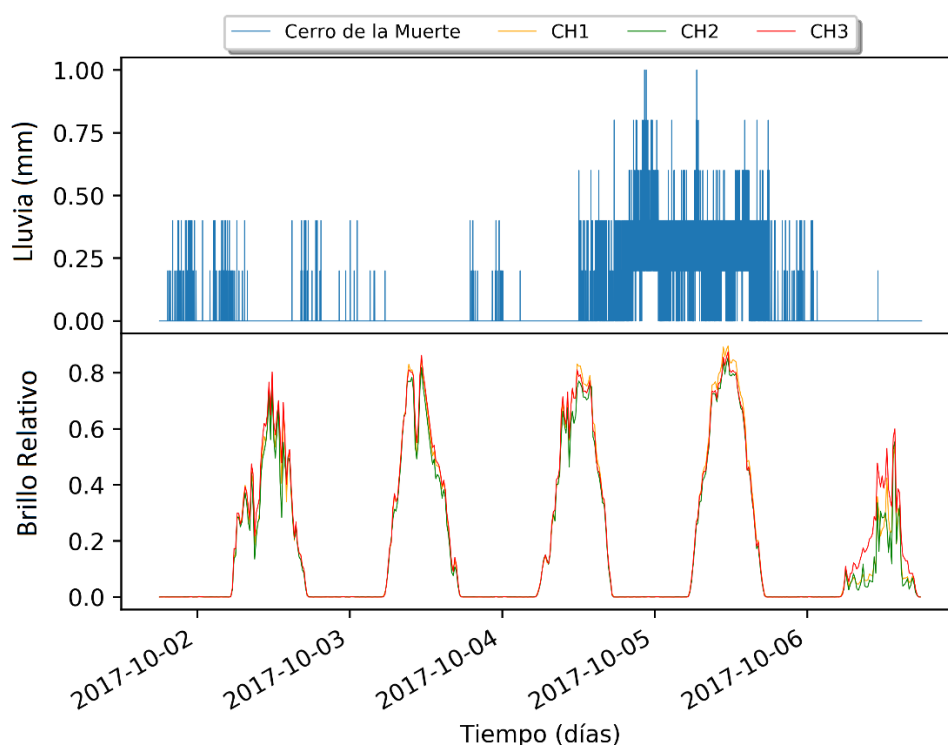


Figura 13. Series de tiempo de la lluvia de la estación meteorológica del Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE, durante el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017.

4.1.2 Comparación entre la lluvia y los canales 4, 5 y 6

En la figura 14 se muestran las series de tiempo de la lluvia y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE. En el caso de los canales del infrarrojo cercano, se observó que, en los días previos al evento extremo de precipitación, los canales 5 y 6 se mantuvieron juntos en la serie de tiempo, mientras que el canal 4 presentó valores más bajos

que los obtenidos por los otros dos. No obstante, en las horas previas a los eventos de lluvia extrema se observaron cambios en el comportamiento de los canales mencionados.

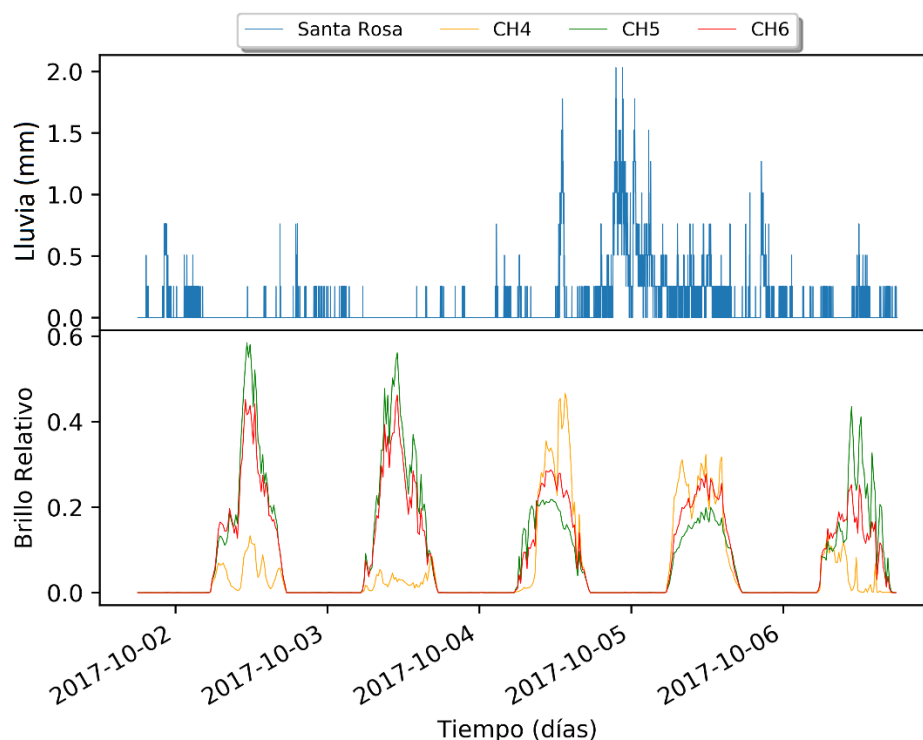


Figura 14. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE, durante el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017.

Para empezar, el canal 4 pasó a ser el que tuvo valores máximos, mientras se vio una clara diferencia entre los canales 5 y 6. En este caso se debe hacer el señalamiento de que estos canales son generados por el sol, lo que evidentemente cambia durante la noche.

4.1.3 Comparación entre la lluvia y los canales 7, 8 y 9

En la figura 15 se muestra la gráfica con las series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Palo Verde y la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE. Al realizar observaciones detalladas del comportamiento de los canales y su relación con la precipitación, se notaron variaciones importantes en los tres canales, con la particularidad de que el canal 7 fue el que presentó saltos más importantes de temperatura de brillo en comparación con los otros dos.

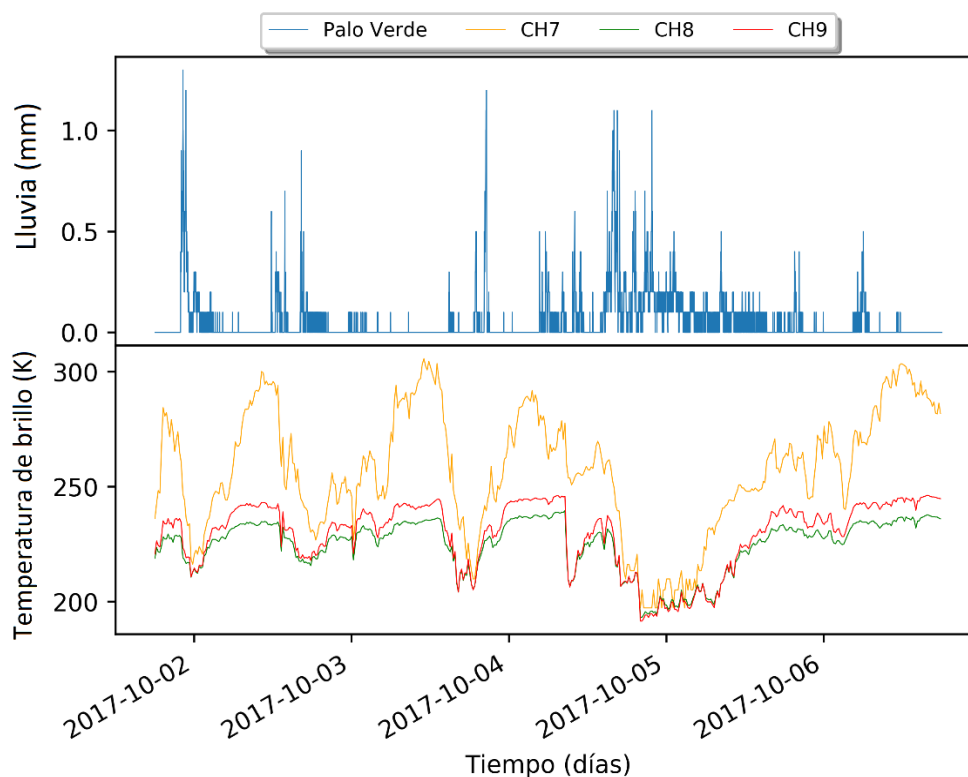


Figura 15. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Palo Verde y de temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE, durante el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017.

Como se aprecia en la figura, el canal 7 se mantiene con valores mucho más altos de temperatura (diferencias de hasta 50 K) que los otros dos en los lapsos en que no hay precipitación o esta es muy escasa, mientras que, en los periodos de lluvia más fuerte la tendencia es que los tres canales presenten mínimos muy similares de temperatura. Aunado a lo anterior, se debe resaltar que el comportamiento señalado, se presentó en prácticamente todos los puntos en que se realizaron las mediciones.

4.1.4 Comparación entre la lluvia y los canales 10 y 11

En la figura 16 se presenta una gráfica con las series de tiempo de la lluvia sobre la estación meteorológica de Palo Verde y de temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE. Como se aprecia en dicha figura, ambos canales poseen un

comportamiento similar, en el cual las variaciones relativas entre mínimos y máximos de ambos suelen ser similares.

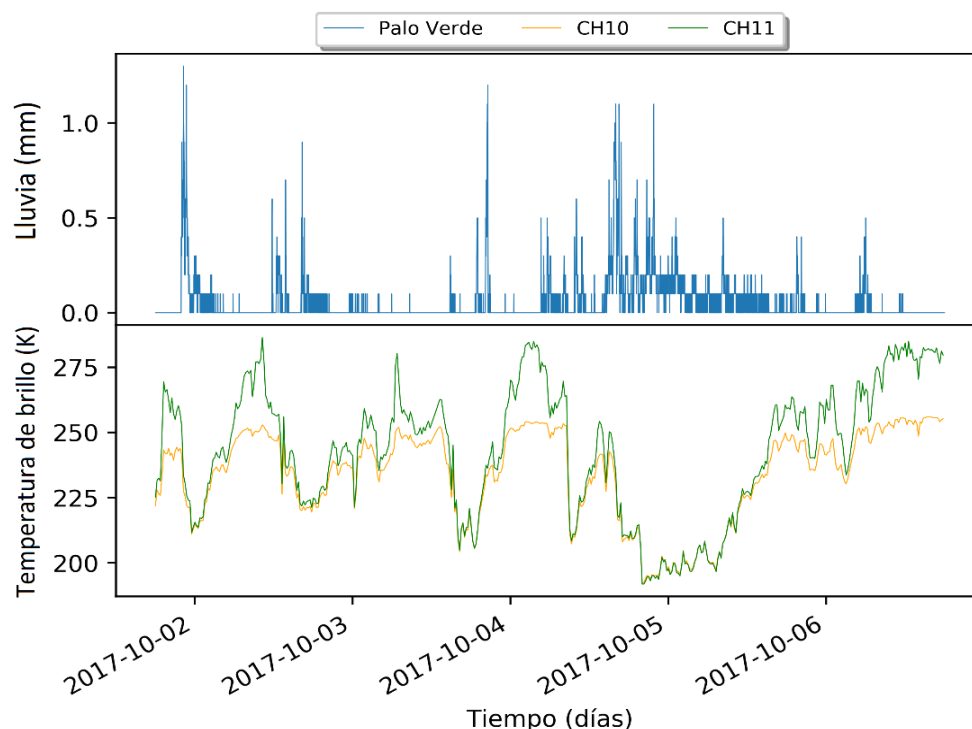


Figura 16. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Palo Verde y de temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE, durante el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017.

Por otra parte, es evidente como el canal 11 siempre mantiene valores de temperatura de brillo más altos que el canal 10, particularmente en los momentos previos al inicio de la precipitación, mientras que durante los eventos severos de lluvia la tendencia es que ambos canales posean mínimos prácticamente iguales. Al igual que con los canales del 7 al 9, el canal 10 y el canal 11 tuvieron un proceder similar en todos los puntos analizados, independientemente de su elevación o de su localización geográfica.

4.1.5 Comparación entre la lluvia y los canales 12, 13, 14, 15 y 16

En la figura 17 se muestra la gráfica de las series de tiempo de la lluvia sobre la estación meteorológica de Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales del 12 al 16 del satélite GOES-ESTE. Lo más evidente que se aprecia en la figura, es que estos canales

mantienen un comportamiento uniforme entre sí, en prácticamente todo el lapso de análisis, con excepción del canal 12 que si muestra cambios evidentes a lo largo de la serie de tiempo.

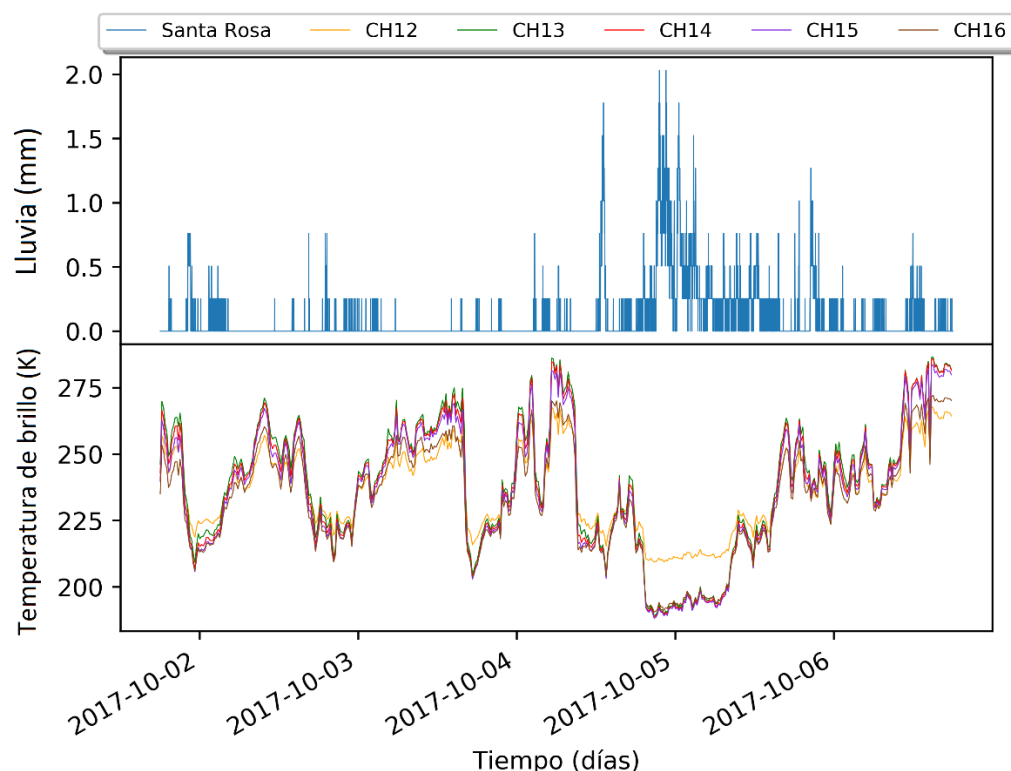


Figura 17. Series de tiempo de la lluvia en la estación meteorológica de Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE, durante el periodo entre los días 2 y 6 de octubre del año 2017.

Así como se mencionó previamente, si se observa con detalle, los valores de temperatura de brillo del canal 12 siempre se mantienen con valores iguales o mayores al resto de canales mientras se tiene precipitación. Lo anterior cambia en los lapsos en que no se tiene lluvia, ya que, si bien se mantiene cercano al resto de canales, suele mantenerse por debajo de estos. Claramente en el caso en que se presentó precipitación intensa es el más notable.

4.2 Algoritmos

Partiendo de la relación entre las gráficas de la lluvia observada y el comportamiento de los canales del GOES-ESTE, es posible desarrollar algoritmos que permitan obtener

información de los píxeles de las imágenes satelitales, que provean evidencia de zonas que cumplan con ciertas condiciones durante los eventos extremos de precipitación.

4.2.1 Algoritmo creado y no seleccionado

La ecuación 4.2.1 muestra la relación que se generó a partir del brillo relativo de los canales 4 y 5 del satélite GOES-ESTE. Esta indica que el valor del brillo relativo del canal 4 menos el del canal 5 del satélite GOES-ESTE debe ser mayor que cero.

Lo anterior, surge de las observaciones realizadas a estos canales durante los momentos en que se presentó lluvia intensa. Dicha relación fue definida como el algoritmo 1 para esta investigación.

$$B_{CH4} - B_{CH5} > 0 \quad (4.2.1)$$

En la figura 18 se observan imágenes de los canales 4 y 5 del satélite GOES-ESTE. Al ser estos canales generados por el sol, suelen ser de muy poca utilidad por la noche y por ende el algoritmo posee una limitante importante en cuanto a su utilidad operativa.

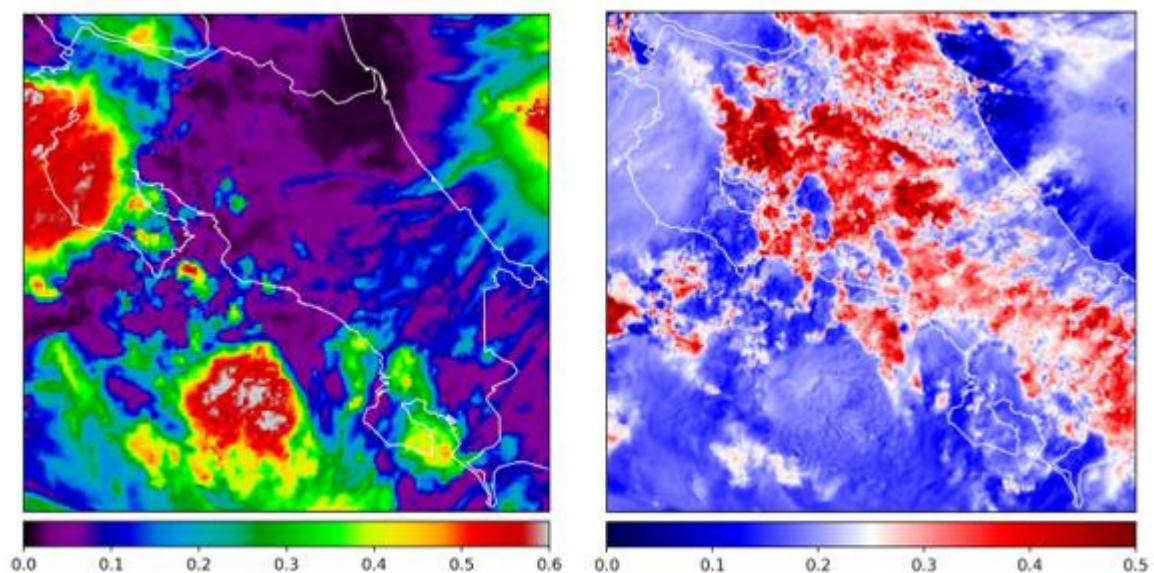


Figura 18. Imágenes de los canales 4 (izquierda) y 5 (derecha) del satélite GOES-ESTE. Ambas con fecha correspondiente al día 4 de octubre del 2017 a las 16:30 UTC.

4.2.2 Algoritmo creado y seleccionado

La ecuación 4.2.2 muestra la relación que se dio entre los canales 12 y 15. Dicha ecuación surge a partir de los análisis realizados a las gráficas de comparación entre la lluvia y la temperatura de brillo de los canales infrarrojos de onda larga del satélite GOES-ESTE.

Esta indica que, si al restar la temperatura de brillo de los canales 12 y 15 se obtienen valores superiores a los 13 K, se dan eventos extremos de precipitación, de acuerdo con los datos recopilados. Dicha relación fue definida como algoritmo 2.

$$T_{CH12} - T_{CH15} > 13K \quad (4.2.2)$$

En la figura 19 se muestran imágenes de los canales 12 y 15 del satélite GOES-ESTE. Al ser estos canales infrarrojos, este algoritmo puede ser utilizado durante las 24 horas del día. Lo anterior es de vital importancia en el desarrollo de tareas operativas en una oficina de pronóstico, ya que permite realizar una vigilancia continua de las condiciones del estado del tiempo. Además, al ser un algoritmo que permite observar zonas con alta probabilidad de lluvia intensa, es claro que su utilización en dichos eventos será fundamental, especialmente cuando se presenten fenómenos hidrometeorológicos de escala sinóptica o inclusive en casos de tormentas eléctricas severas de origen local.

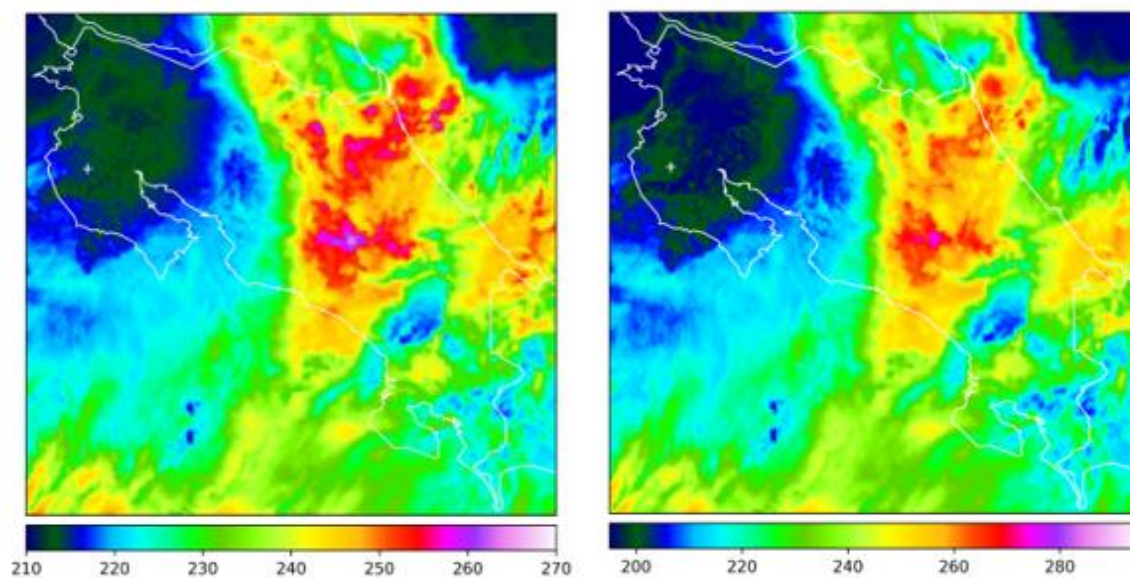


Figura 19. Imágenes de los canales 12 (izquierda) y 15 (derecha) del satélite GOES-ESTE. Ambas con fecha correspondiente al día 5 de octubre del 2017 a las 09:45 UTC.

Asimismo, este algoritmo viene a brindar información sensible en especial sobre sitios que carecen de estaciones meteorológicas en tierra, ya que posee una cobertura tal que permite observar las regiones de más alta convección sin ninguna restricción.

Esto se afirma ya que durante esta investigación se observaron núcleos generados por el algoritmo en diversos sectores del país, tanto en la vertiente del Pacífico, como en la Región Central y en la vertiente del Caribe. De esta manera, se eligió el algoritmo 2 para realizar el estudio e implementar su uso en tareas operativas.

Capítulo 5

5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del algoritmo que se desarrolló para esta investigación. En un primer punto, se muestra el producto obtenido a partir del algoritmo elegido, el cual surge de las imágenes generadas en el periodo de interés de esta investigación. En una segunda parte del capítulo se exponen algunos resultados del algoritmo tanto en el lapso del evento de interés como en un caso posterior que sirvió de verificación para la investigación. Finalmente, se establecen algunos lineamientos que van a permitir la implementación de esta herramienta a los procesos operativos y en los protocolos del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica del IMN.

5.1 Creación de una máscara a partir del algoritmo

En el capítulo anterior se llevó a cabo la elección del algoritmo más útil desde el punto de vista operativo, para poder trabajar con las imágenes de satélite disponibles, que permite detectar las zonas donde probablemente existe fuerte convección y precipitaciones intensas. Este algoritmo puede ser utilizado como una máscara aplicada a cualquier canal del satélite GOES-ESTE, de manera que restrinja de forma detallada las regiones que cumplen con el algoritmo. En la figura 20 a continuación se aprecia un ejemplo de la máscara mencionada.

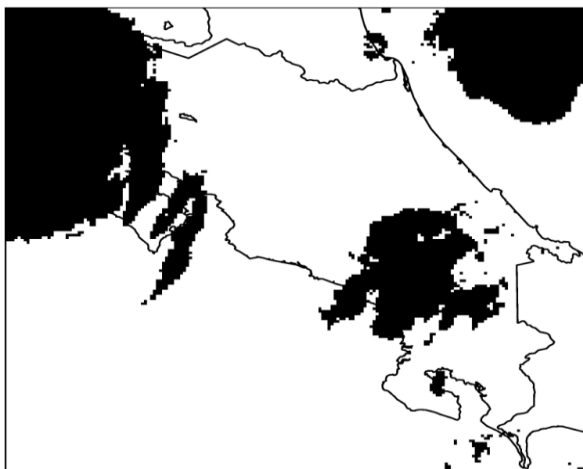


Figura 20. Ejemplo de máscara creada a partir del algoritmo que se diseñó en esta investigación. La imagen corresponde al día 5 de octubre del 2017 a las 05:30 UTC (11:30 pm, hora local).

5.2 Resultados del algoritmo

En la figura 21 que se observa a continuación, se muestran los resultados de aplicar una máscara generada por el algoritmo a las imágenes satelitales del canal 9 del GOES-ESTE. La figura 21 contiene cuatro diferentes momentos en medio de las afectaciones debido a la Tormenta Tropical Nate en el país.

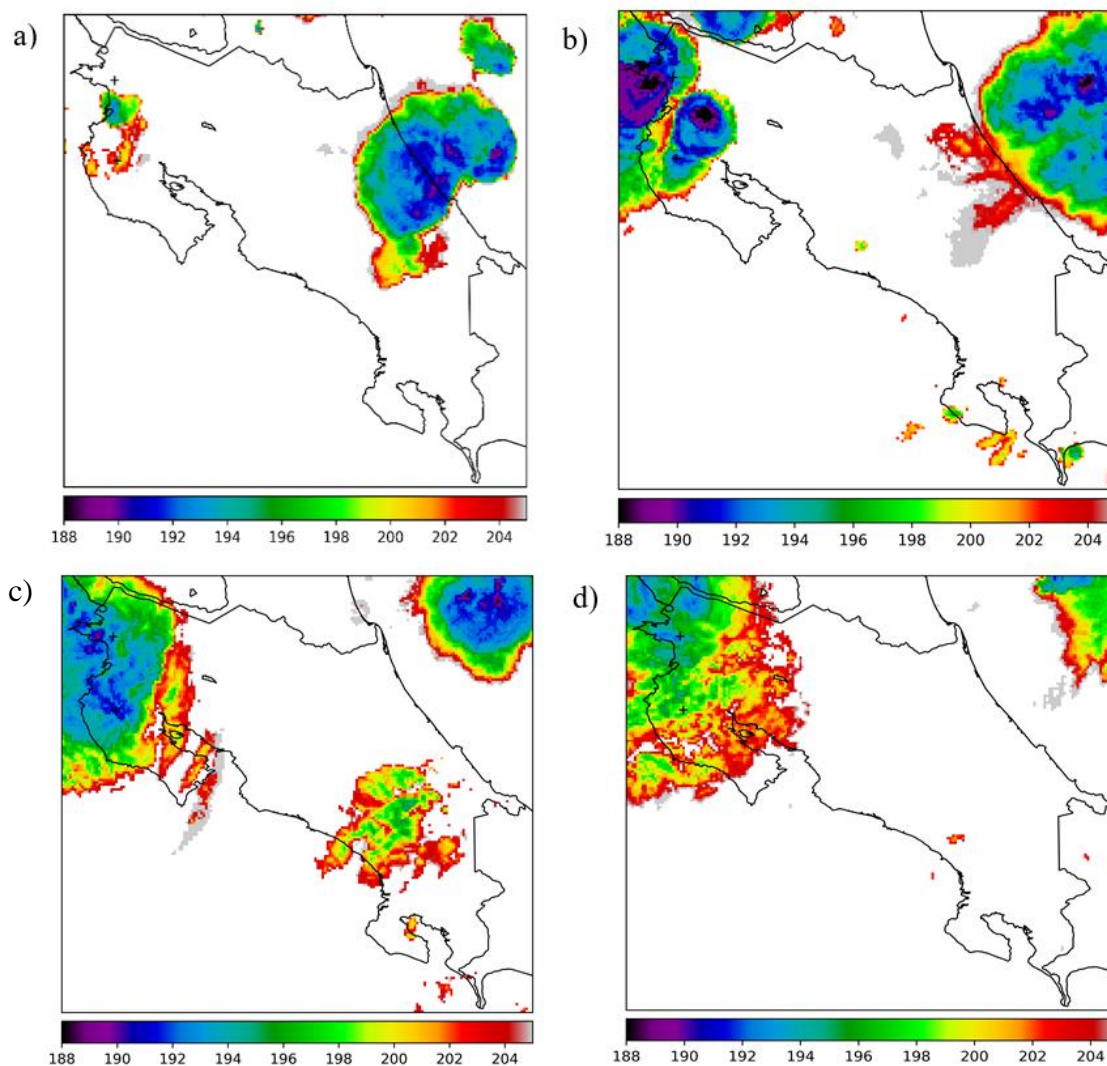


Figura 21. Las imágenes son del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado. a) Imagen de las 05:30 pm del 04 de octubre. b) Imagen de las 07:00 pm del 04 de octubre. c) Imagen de las 11:30 pm del 04 de octubre. d) Imagen de las 03:30 am del 05 de octubre. En todos los casos se señala la hora local de Costa Rica.

Siguiendo la evolución de la convección que se muestra previamente, en la figura 21-a) se observa que la actividad lluviosa más intensa en ese instante se presentó en la Vertiente

del Caribe. Posterior a esto, se aprecia un surgimiento de zonas de convección más fuerte en Guanacaste, las partes altas del Pacífico Central, las cercanías de la Cordillera de Talamanca y del Valle del General, que además fueron regiones sumamente afectadas por estas precipitaciones y que presentaron inundaciones, deslizamientos y múltiples daños a la infraestructura vial⁸.

Además, las zonas de máxima convección generadas por el algoritmo poseen una concordancia muy importante con los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas automáticas en los mismos instantes en que se presentó dicha convección, lo cual es un resultado de suma relevancia para esta investigación.

5.3 Ventajas del algoritmo

Entre las ventajas más importantes de utilizar el algoritmo, se encuentra el hecho de que restringe las áreas con mayor probabilidad de presentar lluvias convectivas, las cuales se asocian a patrones de precipitación intensa. Estas suelen desencadenar inundaciones repentinas a corto plazo en zonas urbanas, así como aumentos en los caudales de ríos y el desbordamiento de los mismos, así como deslizamientos de tierra en zonas vulnerables.

Por otra parte, al proveerle al meteorólogo operativo la capacidad de observar que zonas podrían estar siendo más afectadas. Esto le permite realizar un seguimiento más detallado de las tormentas convectivas, lo cual complementado con el uso de sistemas de información geográfica (SIG), mapas de amenazas y las redes sociales, potencia aún más su capacidad de brindar información más certera. De esta manera, podrá facilitar información de manera más rápida, mejorando los tiempos de intervención de las autoridades de protección civil, ante la posibilidad de enfrentar un impacto severo por las lluvias.

Asimismo, se debe rescatar la versatilidad que posee al permitirle al usuario la utilización de cualquier canal del satélite para su uso, no obstante, para los objetivos planteados en esta investigación se recomienda el uso del canal 9. También se debe rescatar el efecto visual positivo que se obtuvo a partir de este producto, ya que “limpia” las imágenes de posibles

⁸ Fuente: <https://www.cne.go.cr/index.php/269-noticias/timas/1350-309-mil-millones-de-colones-para-la-reconstruccion-convierten-a-nate-en-el-mayor-desastre-de-origen-natural-de-la-historia-en-costa-rica>

zonas que puedan generar ruido ante la presencia de otros tipos de nubes que también reflejan valores bajos de temperatura como lo son los cirros, por ejemplo.

En la figura 22 se observa la diferencia de tener una imagen con el algoritmo aplicado a la par de una sin aplicarle el algoritmo. En esta se aprecia claramente como la interpretación de la información se vuelve mucho sencilla en el caso que posee el algoritmo aplicado. Nótese que esta limita las zonas que presentan convección profunda las cuales son señaladas por las flechas en la imagen y deja en blanco las zonas sin convección. Además, hay cambios sustanciales en la escala de colores que es de gran ayuda para la localización de los toques más fríos de la nube. Esto facilita el desempeño de los meteorólogos en sus funciones operativas, particularmente en la localización de zonas con mayor probabilidad de lluvia fuerte.

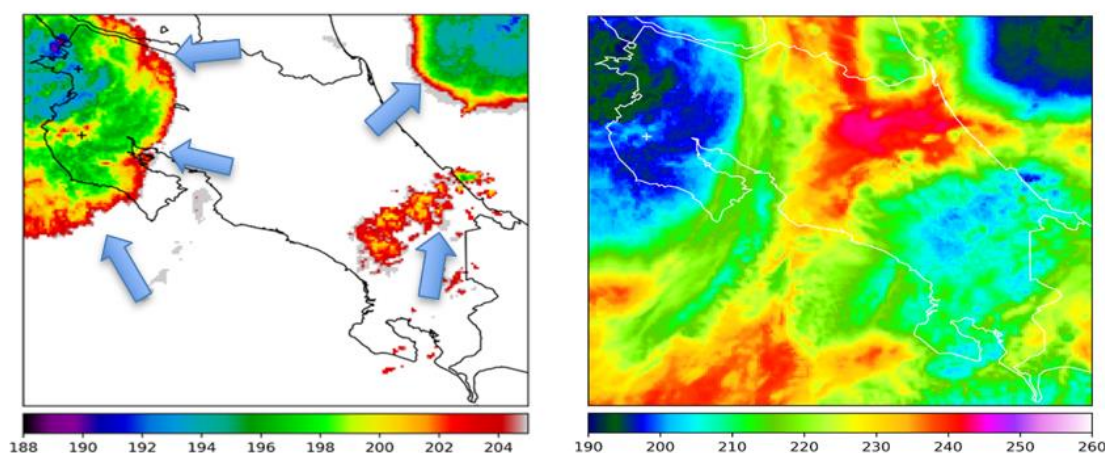


Figura 22. La imagen de la izquierda es del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado, mientras que la otra también es del canal 9 pero sin aplicar el algoritmo. Las flechas en la imagen de la izquierda muestran las zonas resaltadas por el algoritmo. Ambas imágenes son de las 12:30 am (hora local, Costa Rica) del día 05 de octubre de 2017.

5.4 Validación inicial: Caso del 4-5 de octubre de 2018

De acuerdo con el boletín meteorológico mensual facilitado por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), durante los días 4 y 5 de octubre de 2018 se presentaron condiciones lluviosas extremas en algunos puntos de Guanacaste. En la figura 23 se muestra la imagen a) del día 4 de octubre del 2018 a las 4:30 pm, la imagen b) también del día 4 de octubre para las 5:30 pm, la imagen c) del día 5 de octubre a las 4:30 pm y la imagen d) también del día 5 de octubre, pero para las 5:30 pm.

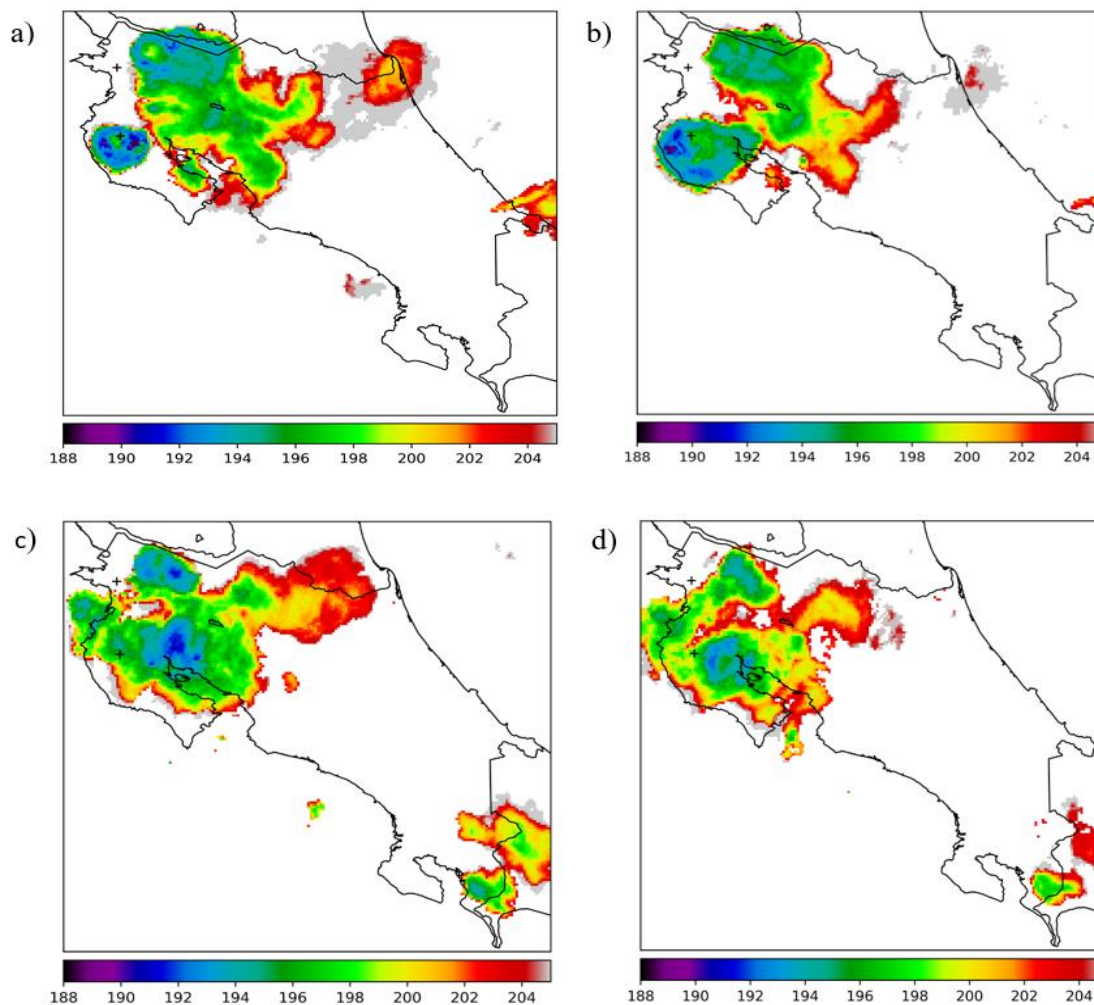


Figura 23. Las imágenes son del canal 9 del satélite GOES-ESTE con el algoritmo aplicado. a) Imagen de las 04:30 pm del 04 de octubre de 2018. b) Imagen de las 05:00 pm del 04 de octubre de 2018. c) Imagen de las 04:30 pm del 05 de octubre de 2018. d) Imagen de las 05:00 pm del 05 de octubre de 2018. En todos los casos se señala la hora local de Costa Rica.

En las imágenes a) y b) se puede notar la evolución que presentó la convección profunda mostrada por el algoritmo, particularmente en Guanacaste, en el Golfo de Nicoya, en la Cordillera Volcánica de Guanacaste, en la Cordillera de Tilarán, en los alrededores de la ciudad de Puntarenas y en Upala y sus cercanías. Dicho comportamiento fue similar en algunos sectores cercanos a los mencionados previamente durante la tarde siguiente, tal como se aprecia en las imágenes c) y d) de la figura 23, donde además se alcanza a observar zonas convectivas en el Pacífico Sur.

Tal como se aprecia en dichas imágenes, en el caso de a), se puede señalar zonas muy puntuales para el caso de la Península de Nicoya, donde la escala de colores alcanza tonalidades azules y púrpura, lo cual implicó la presencia de convección profunda y por ende lluvias muy intensas. Además, deja por fuera sitios donde la probabilidad de precipitaciones intensas es baja. Lo anterior es muy importante en cuanto a la construcción de los avisos meteorológicos, ya que ayuda a minimizar posibles falsas alarmas en algunos sectores, lo cual refuerza la credibilidad de las personas en el trabajo de los pronosticadores.

Por otra parte, debido a este patrón convectivo persistente en la zona mencionada, se presentaron lluvias sumamente intensas y además persistentes, siendo el sector de la Península de Nicoya la región más afectada. Asimismo, se presentaron múltiples incidentes a causa de esta actividad lluviosa, señalados en el boletín meteorológico del IMN para el mes de octubre del 2018. Algunos de estos fueron, inundaciones, deslizamientos, daños a la propiedad privada, a la propiedad del estado y a la infraestructura vial, entre otros.

5.5 Implementación de la herramienta en el IMN

Este trabajo de investigación viene a marcar un antes y un después en la utilización de la información satelital en nuestro país, ya que de ahora en adelante se cuenta con una herramienta operativa que va a permitir realizar un seguimiento muy preciso de los desarrollos nubosos convectivos asociados a lluvias severas en cualquier punto del país. Esto es de gran utilidad particularmente, en a las localidades de país en donde no se cuenta con estaciones meteorológicas automáticas que permitan determinar la presencia de la intensidad de la precipitación.

La implementación de este nuevo sistema en el IMN ha sido un proceso exitoso, ya que fue incorporado en el protocolo de atención de emergencias del IMN (particularmente a lo interno del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica) en el cual se incluyen todos los procedimientos para atender un evento hidrometeorológico extremo en diferentes escalas espaciales y temporales.

Este se ha convertido en una herramienta muy útil en el proceso de pronóstico de muy corto plazo (NOWCasting). Además, en la visión nueva que regirá la pronosticación de corto, mediano y largo plazo en nuestro país: el Weather-Ready Nation. Ambos procesos de

pronóstico tienen el objetivo primordial de prevenir a la población, instituciones de primera respuesta, instituciones estatales de planificación de inversión, ministerios, personas y empresas privadas.

Además, se canalizará esta información de tal manera que fluya a entidades como la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y al Centro de Operaciones de Emergencia. Dichos entes se encargan del manejo de las alertas en el país y además tienen la tarea de coordinar con otras instituciones como los Bomberos, la Cruz Roja, el MOPT, entre otras.

En síntesis, la implementación de este nuevo producto traerá consigo la posibilidad de brindar mejor información a las personas u organizaciones que lo requieran. En muchas ocasiones, la diferencia entre la vida y la muerte es simplemente entre tener o no tener información correcta en el momento clave para alertar a quienes se encuentran en riesgo. Lo anterior es parte de lo que este tipo de herramienta persigue, lo cual es precisamente generar información veraz y certera. Con esto, quien se encuentre en algún riesgo tenga la posibilidad de tomar una decisión informada acerca de qué hacer ante una eventual situación de peligro.

Capítulo 6

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Al realizar los análisis referidos a las comparaciones entre las series de tiempo de los canales del GOES-ESTE y de las series de lluvia, se logró establecer cómo en algunos casos se tuvo comportamientos en los que los prácticamente no hubo cambios. Además, hubo otros casos en los que la presencia de actividad lluviosa intensa proporcionó modificaciones notables en el proceder de las series de tiempo de algunos de estos canales del satélite en cuestión.

Asimismo, mediante la utilización de la información obtenida de dichas relaciones, se logró desarrollar con éxito un algoritmo que será usado para el seguimiento de tormentas severas, lo cual será de gran ayuda para el desempeño de tareas operativas de los servicios meteorológicos, en especial en zonas en las que la cobertura de estaciones meteorológicas automáticas es escasa o hasta nula.

Por otra parte, dicho algoritmo se utilizó durante lapsos distintos al del estudio. Esto se hizo durante otros eventos convectivos con el fin de someterlo a prueba y de esa forma verificar su efectividad o inclusive observar posibles falsos positivos al respecto.

De esta forma, y a partir de lo anterior, se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se descartó el uso de los canales 1, 2 y 3 en la elaboración del algoritmo, ya que no proporcionó información relevante que sirviera para este fin; sin embargo, para efectos visuales durante el día, estos canales son una herramienta de gran utilidad. Además, al ser sensores que requieren de luz solar, pierden utilidad durante las noches.
- Seguidamente, las series de tiempo de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 si mostraron un proceder interesante, con una respuesta muy marcada del canal 4 durante los eventos fuertes de precipitación, así como una tendencia de los otros dos canales a mantenerse separados; además, también son sensores de uso diurno, por lo que pierden utilidad durante la noche.

- Luego, las series de tiempo de temperatura de brillo de los canales infrarrojos del 7 al 16. Estos presentaron una tendencia similar en el comportamiento de dicha variable durante los lapsos en que se presentó actividad lluviosa intensa, acercándose a los valores mínimos de temperatura generados en la gráfica. Además, se observó que conforme las lluvias disminuyen su intensidad, dichos valores aumentaron de forma gradual.
- Por otro lado, de acuerdo con lo analizado, los canales infrarrojos en la zona de absorción de vapor de agua fueron los que mejores observaciones ofrecieron para dar seguimiento a la actividad convectiva severa. Asimismo, es claro que durante el día las imágenes de los canales visibles de alta resolución también son de gran utilidad para determinar este comportamiento de la lluvia.
- Al realizar la validación con el evento presentado en el Pacífico Norte en octubre de este año 2018, las conclusiones fueron similares a las obtenidas en el caso de la Tormenta Tropical Nate.
- Las comparaciones entre las imágenes del canal 9 con la máscara (con el algoritmo aplicado) y sin la máscara, nos muestran diferencias claras. La información se concentra en las áreas de precipitación convectiva, puntualizando de forma muy precisa donde se dan los máximos de convección y, por ende, las zonas con probabilidad de lluvia intensa. Lo anterior, apoyado en los sistemas de información geográfica, permite agilizar la intervención de las instituciones de primera respuesta ante posibles afectaciones ligadas a estos fenómenos.
- La implementación de este producto satelital representa un logro de mucha relevancia, ya que al poder encontrar esta relación entre los sensores del satélite y los datos obtenidos en tierra, se ha obtenido una herramienta de estimación de posible lluvia fuerte en lugares que pueden carecer de una red adecuada de estaciones meteorológicas, lo cual en Costa Rica suele ser la norma para algunas regiones del Pacífico y el Caribe, o en zonas protegidas como Parques Nacionales donde no es permitido instalar equipo de medición como estaciones automáticas.
- Además, la experiencia por parte de los usuarios del producto en el IMN ha sido muy positiva, en especial por la posibilidad de tener información sobre actividad lluviosa

fuerte en sitios con poca o ninguna cobertura de estaciones automáticas. Asimismo, ha permitido realizar seguimiento y brindar aviso sobre la posición y movilización de tormentas a muy corto plazo, situación de mucha relevancia especialmente en sitios con alta vulnerabilidad a inundaciones repentinas o deslizamientos.

6.2. Recomendaciones

Algunas recomendaciones serían:

- Los datos georreferenciados que se obtienen con este producto satelital deben ser utilizados como un elemento fundamental en el proceso de pronóstico de nowCASTING o de muy corto plazo, así como en la implementación y el desarrollo del Programa Weather Ready Nation (WRN).
- Realizar comparaciones con datos de estaciones meteorológicas en tierra y con imágenes de radar, con el fin de realizar análisis estadísticos alrededor de esta herramienta.
- Determinar si existe alguna tendencia a presentar falsos positivos en situaciones particulares. Por ejemplo, la presencia de nubes cirrus suele ser un posible indicador de temperaturas bajas en la alta atmósfera, lo cual puede generar una situación de este tipo.
- Ampliar el estudio a eventos fuertes, pero que conlleven cantidades altas de lluvia estratificada y no convectiva.
- Ahora que la implementación del sistema es una realidad, documentar eventos severos que permitan realizar verificaciones del producto.
- Desarrollar un algoritmo que permita cuantificar la razón de precipitación de acuerdo con la escala observada en el producto.
- Otra recomendación de suma relevancia es la realización de un estudio alrededor de este producto en otros países de la región Centroamericana y el Caribe, ya que, de obtenerse resultados similares, se brindaría un gran apoyo a las actividades operativas de las oficinas de pronóstico de todos los países del área, en especial durante eventos severos de precipitación, lo cual es bastante frecuente en buena parte del año.

Bibliografía

- Ackerman, S. A., & Strabala, K. I. (2004). Satellite remote sensing of H₂SO₄ aerosol using the 8- to 12- μ m window region: Application to Mount Pinatubo. *Journal of Geophysical Research*, 99(D9), 18639. <https://doi.org/10.1029/94jd01331>
- Alfaro E. y Quesada A. (2010). Ocurrencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe y sus impactos sobre Centroamérica. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, XI (22), 136-153.
- Alfaro, E. J., Quesada, A., & Solano, F. (2010). Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el mar Caribe desde 1968-2007. *Diálogos. Revista Electrónica de Historia*, 11(1), 22–38. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/dialogos/article/view/578/640>
- Apke, J. M., Mecikalski, J. R., & Jewett, C. P. (2016). Analysis of mesoscale atmospheric flows above mature deep convection using super rapid scan geostationary satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(9), 1859–1887. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0253.1>
- Baum, B. A., Kratz, D. P., Yang, P., Ou, S. C., Hu, Y., Soulen, P. F., & Tsay, S. C. (2000). Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCES, 1. Data and models. *Journal of Geophysical Research*, 105(May 1996), 767–780. <https://doi.org/10.1029/1999JD901089>
- Bedka, K. M., & Khlopenkov, K. (2016). A probabilistic multispectral pattern recognition method for detection of overshooting cloud tops using passive satellite imager observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(9), 1983–2005. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0249.1>
- Bedka, K., Murillo, E. M., Homeyer, C. R., Scarino, B., & Mersiovsky, H. (2018). The Above-Anvil Cirrus Plume: An Important Severe Weather Indicator in Visible and Infrared Satellite Imagery. *Weather and Forecasting*, 33(5), 1159-1181. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0040.1>
- Chung, S., Ackerman, S., van Delst, P. F., & Menzel, W. P. (2010). Model Calculations and Interferometer Measurements of Ice-Cloud Characteristics. *Journal of Applied Meteorology*, 39(5), 634–644. <https://doi.org/10.1175/1520-0450-39.5.634>
- Cintineo, J. L., Pavolonis, M. J., Sieglaff, J. M., & Heidinger, A. K. (2013). Evolution of severe and nonsevere convection inferred from GOES-derived cloud properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2009-2023. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0330.1>

- Davies, M. A., & Rose, W. I. (1998). GOES imagery fills gaps in Montserrat volcanic cloud observations. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(42), 505-507. <https://doi.org/10.1029/98EO00374>.
- Dunion, J. P., & Velden, C. S. (2004). The Impact of the Saharan Air Layer on Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 353–366. <https://doi.org/10.1175/bams-85-3-353>
- Dworak, R., Bedka, K., Brunner, J., & Feltz, W. (2012). Comparison between GOES-12 overshooting-top detections, WSR-88D radar reflectivity, and severe storm reports. *Weather and Forecasting*, 27(3), 684-699. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00070.1>
- Ebert, E. E., & Manton, M. J. (2002). Performance of Satellite Rainfall Estimation Algorithms during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(9), 1537–1557. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055<1537:posrea>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<1537:posrea>2.0.co;2)
- Ebert, E. E., Janowiak, J. E., & Kidd, C. (2007). Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(1), 47–64. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-1-47>
- Ellrod, G. P., Achutuni, R. V., Daniels, J. M., Prins, E. M., & Nelson III, J. P. (1998). An assessment of GOES-8 imager data quality. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(11), 2509-2526.
- Fujita, T. T. (1989). The Teton-Yellowstone tornado of 21 July 1987. *Monthly Weather Review*, 117(9), 1913-1940. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1913:TTYTOJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1913:TTYTOJ>2.0.CO;2)
- Gao, B. C., Yang, P., Han, W., Li, R. R., & Wiscombe, W. J. (2002). An algorithm using visible and 1.38- μ m channels to retrieve cirrus cloud reflectances from aircraft and satellite data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1659–1668. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802454>
- Gottschalck, J., Meng, J., Rodell, M., & Houser, P. (2005). Analysis of Multiple Precipitation Products and Preliminary Assessment of Their Impact on Global Land Data Assimilation System Land Surface States. *Journal of Hydrometeorology*, 6(5), 573–598. <https://doi.org/10.1175/jhm437.1>
- Heymsfield, G. M., Blackmer Jr, R. H., & Schotz, S. (1983). Upper-level structure of Oklahoma tornadic storms on 2 May 1979. I: Radar and satellite observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(7), 1740-1755. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1740:ULSOOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1740:ULSOOT>2.0.CO;2)

- Heymsfield, G. M., & Blackmer Jr, R. H. (1988). Satellite-observed characteristics of Midwest severe thunderstorm anvils. *Monthly Weather Review*, 116(11), 2200-2224. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2200:SOCOMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2200:SOCOMS>2.0.CO;2)
- Heymsfield, G. M., Fulton, R., & Spinhirne, J. D. (1991). Aircraft overflight measurements of midwest severe storms: Implications and geosynchronous satellite interpretations. *Monthly Weather Review*, 119(2), 436-456. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0436:AOMOMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0436:AOMOMS>2.0.CO;2)
- Hutchison, K. D. (1999). Application of AVHRR/3 imagery for the improved detection of thin cirrus clouds and specification of cloud-top phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(12), 1885-1899.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y Comité Regional de Recursos Hídricos (CRRH), (2008). El clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. *Proyecto Segunda Comunicación sobre Cambio Climático en Costa Rica*. IMN, CRRH. San José, C.R.
- Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Li, R. R., Gao, B. C., & Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1- μ m channel -- correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35(5); *Other Information: PBD: Sep 1997, Medium: X; Size: pp. 1286-1298.*
- Kellenbenz, D. J., Grafenauer, T. J., & Davies, J. M. (2007). The North Dakota tornadic supercells of 18 July 2004: Issues concerning high LCL heights and evapotranspiration. *Weather and Forecasting*, 22(6), 1200-1213. <https://doi.org/10.1175/2007WAF2006109.1>
- Kossin, J. P. (2002). Daily Hurricane Variability Inferred from GOES Infrared Imagery. *Monthly Weather Review*, 130(9), 2260–2270. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2260:dhvifg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2260:dhvifg>2.0.co;2)
- Kubota, T., Ushio, T., Shige, S., Kida, S., Kachi, M., & Okamoto, K. I. (2009). Verification of High-Resolution Satellite-Based Rainfall Estimates around Japan Using a Gauge-Calibrated Ground-Radar Dataset. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87A, 203–222. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87a.203>
- Kuciauskas, A., J. Solbrig, T. Lee, J. Hawkins, S. Miller, M. Surratt, K. Richardson, R. Bankert, & J. Kent, 2013: Next-Generation Satellite Meteorology Technology Unveiled. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 1824–1825, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00007.1>
- Kuligowski, R. J. (2010). GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) algorithm theoretical basis document for rainfall rate (QPE). *Algorithm Theoretical Basis Doc.*, NOAA/NESDIS.

- Lindsey, D. T., & Bunkers, M. J. (2005). Observations of a Severe, Left-Moving Supercell on 4 May 2003. *Weather and Forecasting*, 20(1), 15–22. <https://doi.org/10.1175/waf-830.1>
- Lindsey, D. T., Hillger, D. W., Grasso, L., Knaff, J. A., & Dostalek, J. F. (2006). GOES Climatology and Analysis of Thunderstorms with Enhanced 3.9- μ m Reflectivity. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2342–2353. <https://doi.org/10.1175/MWR3211.1>
- Moody, J. L., Wimmers, A. J., & Davenport, J. C. (1999). Remotely sensed specific humidity: Development of a derived product from the GOES imager channel 3. *Geophysical Research Letters*, 26(1), 59–62. <https://doi.org/10.1029/1998GL900222>
- Negri, A. J., & Adler, R. F. (1981). Relation of satellite-based thunderstorm intensity to radar-estimated rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, 20(3), 288–300. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<0288:ROSBTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<0288:ROSBTI>2.0.CO;2)
- Prata, A. J. (1989). Observations of volcanic ash clouds in the 10–12 μ m window using AVHRR/2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(4–5), 751–761.
- Prins, E. M., Feltz, J. M., Menzel, W. P., & Ward, D. E. (1998). An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D24), 31821–31835. <https://doi.org/10.1029/98JD01720>
- Realmuto, V. J., Sutton, A. J., & Elias, T. (2004). Multispectral thermal infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea Volcano, Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7), 15057–15072. <https://doi.org/10.1029/96jb03916>
- Retana J.A. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 11:52–64.
- Reynolds, D. W. (1980). Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data. *Monthly Weather Review*, 108(3), 337–348. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0337:OODHFG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0337:OODHFG>2.0.CO;2)
- ROSENFELD, Daniel, et al. Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D4). <https://doi.org/10.1029/2007JD008600>
- Sapiano, M. R. P., & Arkin, P. A. (2008). An Intercomparison and Validation of High-Resolution Satellite Precipitation Estimates with 3-Hourly Gauge Data. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 149–166. <https://doi.org/10.1175/2008jhm1052.1>

- Schmit, T. J., Gunshor, M. M., Menzel, W. P., Gurka, J. J., Li, J., & Bachmeier, A. S. (2005). Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(8), 1079–1096. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-8-1079>
- Schmit, T.J., P. Griffith, M.M. Gunshor, J.M. Daniels, S.J. Goodman, and W.J. Lebar, 2017: A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 681–698, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00230.1>
- Schreiner, A. J., Strabala, K. I., Unger, D. A., Menzel, W. P., Ellrod, G. P., & Pellet, J. L. (2002). A Comparison of Ground and Satellite Observations of Cloud Cover. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(10), 1851–1861. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<1851:acogas>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<1851:acogas>2.0.co;2)
- Serra, Y. L., Kiladis, G. N., & Hodges, K. I. (2010). Tracking and mean structure of easterly waves over the Intra-Americas Sea. *Journal of Climate*, 23(18), 4823–4840. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3223.1>
- Soden, B. J., & Bretherton, F. P. (2008). Upper tropospheric relative humidity from the GOES 6.7 μm channel: Method and climatology for July 1987. *Journal of Geophysical Research*, 98(D9), 16669. <https://doi.org/10.1029/93jd01283>
- Sohn, B. J., Han, H. J., & Seo, E. K. (2010). Validation of satellite-based high-resolution rainfall products over the Korean Peninsula using data from a dense rain gauge network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(4), 701–714. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2266.1>
- Strabala, K. I., Ackerman, S. A., & Menzel, W. P. (2002). Cloud Properties inferred from 8-12- μm Data. *Journal of Applied Meteorology*, 33(2), 212–229. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0212:cpifd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0212:cpifd>2.0.co;2)
- Taylor, M. A., & Alfaro, E. J. (2005). Central America and the Caribbean, Climate of. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 183–189). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_37
- Tian, Y., Peters-Lidard, C. D., Choudhury, B. J., & Garcia, M. (2008). Multitemporal Analysis of TRMM-Based Satellite Precipitation Products for Land Data Assimilation Applications. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6), 1165–1183. <https://doi.org/10.1175/2007jhm859.1>
- Velden, C. S., Olander, T. L., & Zehr, R. M. (2002). Development of an Objective Scheme to Estimate Tropical Cyclone Intensity from Digital Geostationary Satellite Infrared Imagery. *Weather and Forecasting*, 13(1), 172–186. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0172:doaost>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0172:doaost>2.0.co;2)

- Velden, C. S., Olander, T. L., & Wanzong, S. (2002). The Impact of Multispectral GOES-8 Wind Information on Atlantic Tropical Cyclone Track Forecasts in 1995. Part I: Dataset Methodology, Description, and Case Analysis. *Monthly Weather Review*, 126(5), 1202–1218. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1202:tiomgw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1202:tiomgw>2.0.co;2)
- Vicente, G. A., Scofield, R. A., & Menzel, W. P. (1998). The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9), 1883–1893.
- Weldon, R. B., & Holmes, S. (1991). Water vapor imagery: interpretation and applications to weather analysis and forecasting, NOAA, US Department of Commerce. Washington DC, *Technical report*, NESDIS57.
- Wu, X., Menzel, W. P., & Wade, G. S. (1999). Estimation of sea surface temperatures using GOES-8/9 radiance measurements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(6), 1127-1138.
- Wylie, D. P., & Menzel, W. P. (1999). Eight years of high cloud statistics using HIRS. *Journal of Climate*, 12(1), 170–184. <https://doi.org/10.1175/1520-0442-12.1.170>
- Zárate E. (2005). Comportamiento de los Empujes Fríos que alcanzan Centroamérica y el Caribe. *Documento Técnico, CRRH-UCR-CIGEFI-AIACC-LA06*. San José, CR. 25pp.

Enlaces de Internet

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL (1999). Costa Rica: evaluación de los daños ocasionados por el huracán Mitch. LC/MEX/L.373. Recuperado de <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/9/15499/1373-1.pdf>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, CNE (2018). 309 mil millones de colones para la reconstrucción convierten a Nate en el mayor desastre de origen natural de la historia en Costa Rica. Recuperado el 23 de abril de 2018 de <https://www.cne.go.cr/index.php/269-noticias/timas/1350-309-mil-millones-de-colones-para-la-reconstruccion-convierten-a-nate-en-el-mayor-desastre-de-origen-natural-de-la-historia-en-costa-rica>
- Esquivel Rodríguez C. y Montero Sánchez A., (2017). Gestión y Respuesta del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo ante el caso del Huracán Otto. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Recuperado el 23 abril de 2018 de https://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Montero_A-y-Esquivel_C_2017.pdf

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 1 (“Blue” visible). Recuperado en abril de 2018 de:

https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI%20Band%201%20Fact%20Sheet_Revised%202.24.15.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 2 (“Red” visible). Recuperado en abril de 2018 de:

<https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI%20Fact%20Sheet%20Band%202.pdf>.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 3 (The “vegetation” near-infrared band). Recuperado en abril de 2018 de:

[https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI%20Fact%20Sheet%20Band%203%20\(Veggie\)_FINAL.pdf](https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI%20Fact%20Sheet%20Band%203%20(Veggie)_FINAL.pdf).

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 4 (“Cirrus” near-infrared). Recuperado en abril de 2018 de:

https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI_Band%204_cirrus_factsheet_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 5 (“Snow/Ice” near-infrared). Recuperado en abril de 2018 de:

https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI_Band%205_snow-ice_factsheet_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 6 (“Cloud Particle Size” near-infrared). Recuperado en abril de 2018 de:

<https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABIBand6CloudParticleSizeFactSheetFINAL.pdf>.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 7 (“Shortwave window” infrared). Recuperado en abril de 2018 de:

<https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABIBand7ShortwaveWindowFINAL.pdf>.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 8 (“Upper-level water vapor” infrared). Recuperado en abril de 2018 de:

<https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABIBand8UpperLevelWVFINAL.pdf>.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 9 (“mid-level water vapor” infrared band). Recuperado en abril

de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABIBand9_MidLevelWV_IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 10 (“lower-level water vapor” infrared band). Recuperado en abril de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABIBand10_LowerLevel_WV-IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 11 (“cloud-top phase” infrared band). Recuperado en abril de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI_Band11_Cloud-top_Phase_IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2015). GOES-R ABI Fact Sheet Band 12 (“ozone” infrared band). Recuperado en abril de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI_Band12_Ozone_Final.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2016). GOES-R ABI Fact Sheet Band 13 (“clean” longwave infrared window band). Recuperado de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/ABI_Band_13_FS_CLEAN_LW_IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2016). GOES-R ABI Fact Sheet Band 14 (longwave infrared window band). Recuperado en abril de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/Band_14FS_LONGWAVE_IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2016). GOES-R ABI Fact Sheet Band 15 (“dirty” longwave infrared window band). Recuperado de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/Band_15FS_DIRTY_LW_IR_FINAL.pdf.

NOAA Satellite and Information Services | GOES-R Program Office. (2016). GOES-R ABI Fact Sheet Band 16 (“CO2” longwave infrared band). Recuperado en abril de 2018 de: https://www.goes-r.gov/education/docs/ABI-bands-FS/Band_16FS_CO2_LW_IR_FINAL.pdf.

The COMET Program. (2012). GOES-R: beneficios de la observación ambiental de próxima generación. Recuperado de: https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=980.

The COMET Program. (2014). El ABI del GOES-R: la próxima generación de Satélites. Recuperado en abril de 2018 de: https://www.meted.ucar.edu/goes_r/abi_es/explore.htm.

Anexos

Anexo 1

En esta sección se muestran las gráficas de series de tiempo de valores normalizados de lluvia de todas las estaciones utilizadas en esta investigación, y de los valores normalizados de temperatura de brillo de todos los canales del satélite GOES-ESTE. Se debe señalar que las series de tiempo de la estación de Santa Cruz comprenden un menor lapso que las demás estaciones. Lo anterior, debido a que esta se puso en funcionamiento durante el evento severo de precipitación para efectos meramente académicos, mientras que las otras estaciones son operativas.

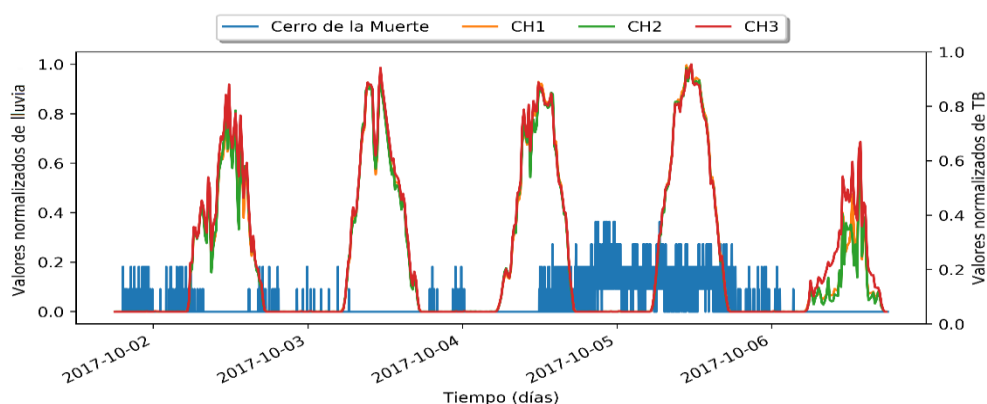


Figura A1. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

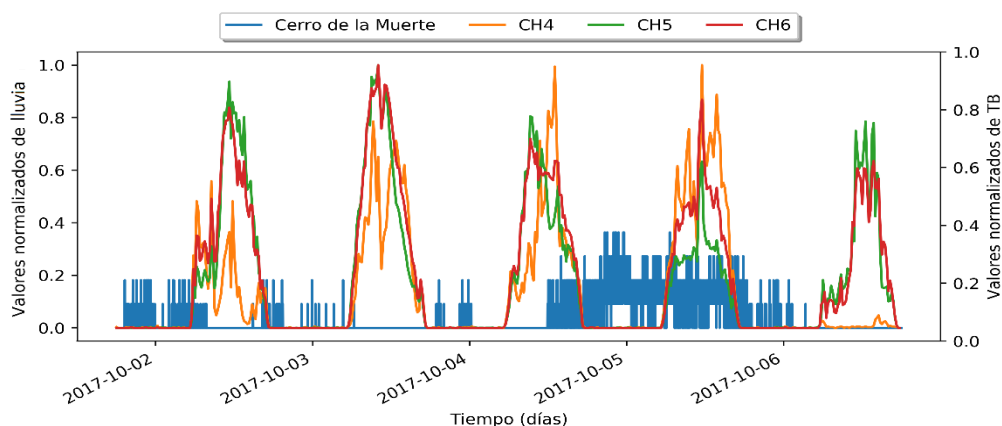


Figura A2. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

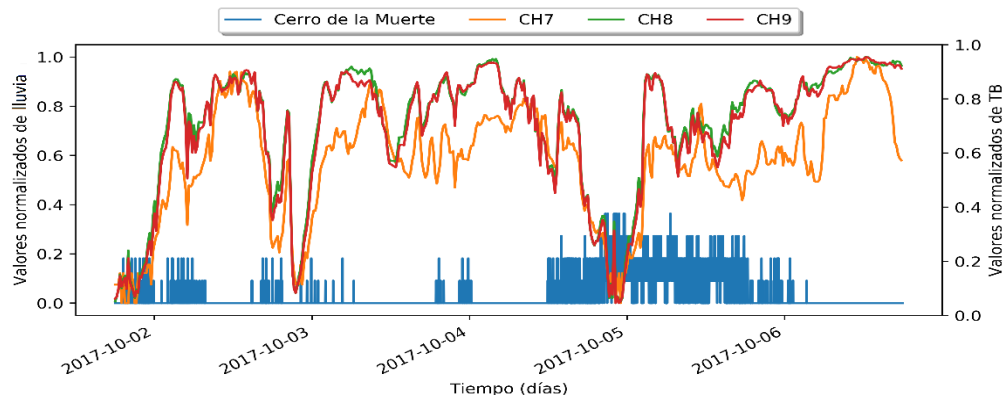


Figura A3. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

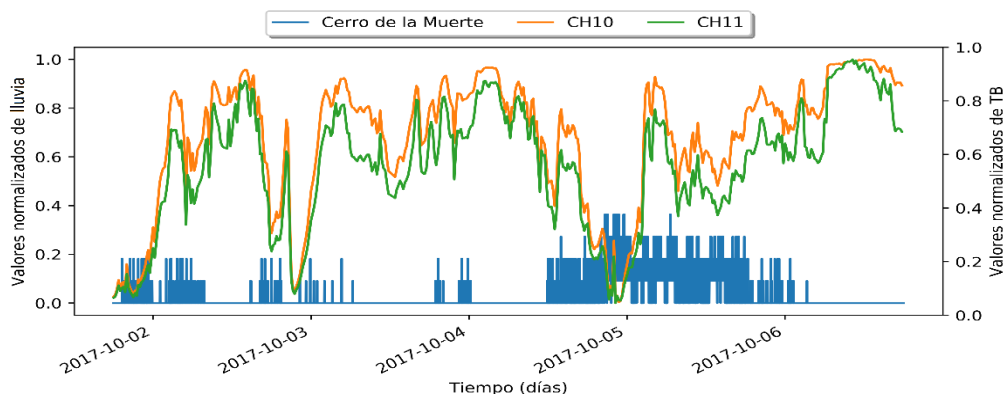


Figura A4. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

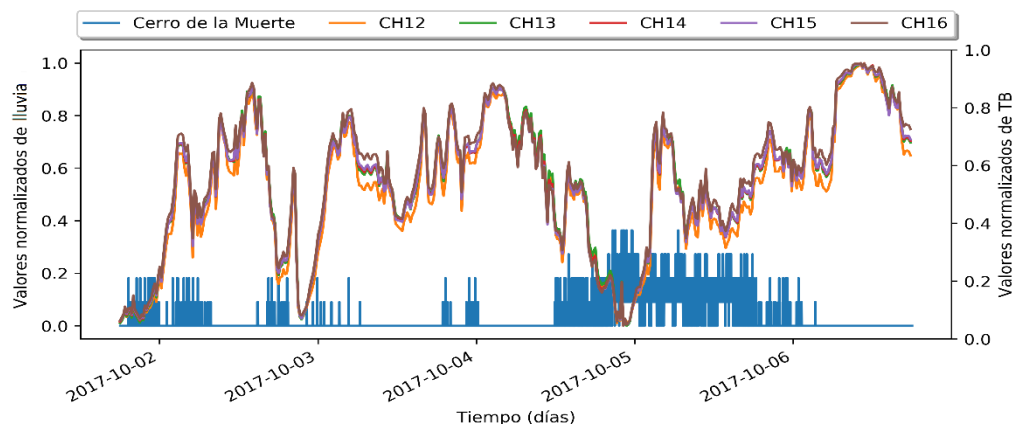


Figura A5. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

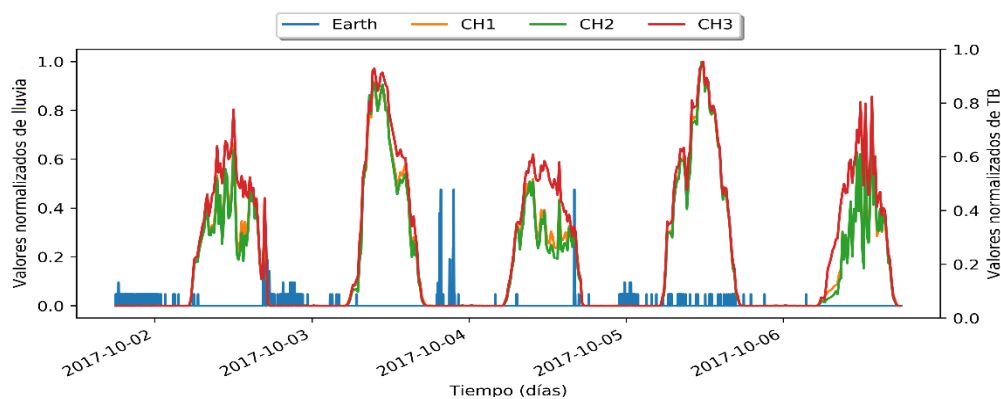


Figura A6. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

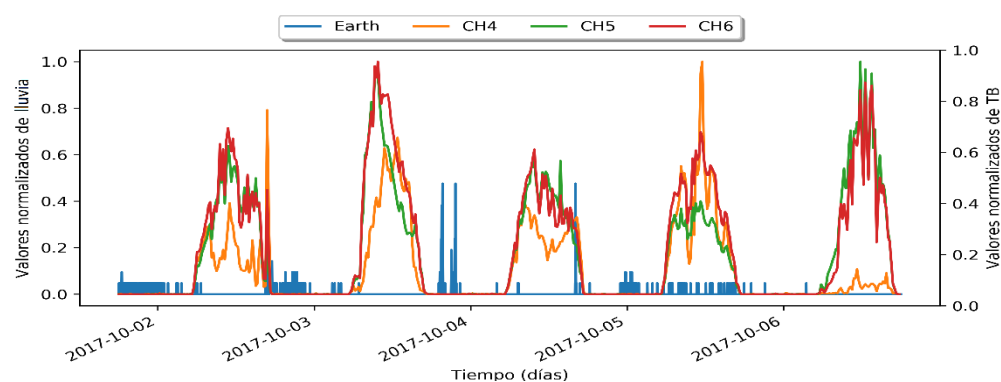


Figura A7. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

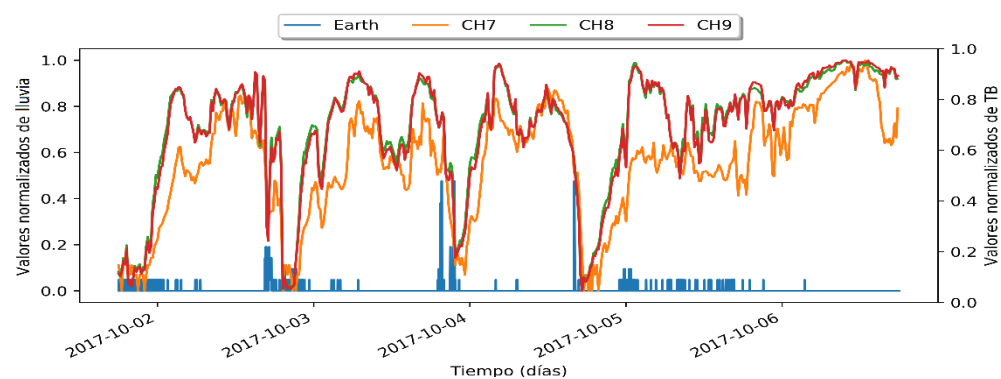


Figura A8. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

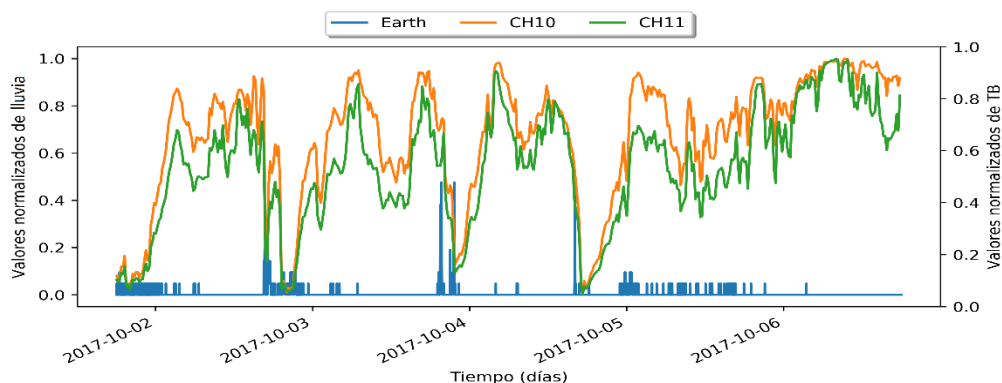


Figura A9. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

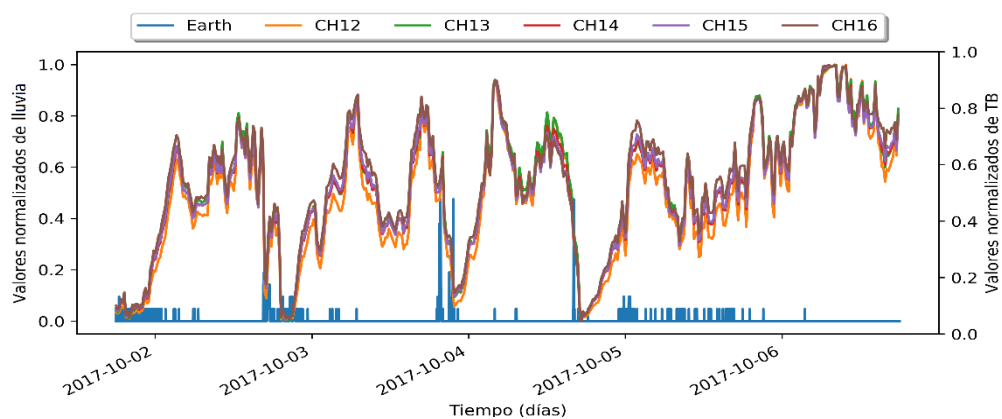


Figura A10. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

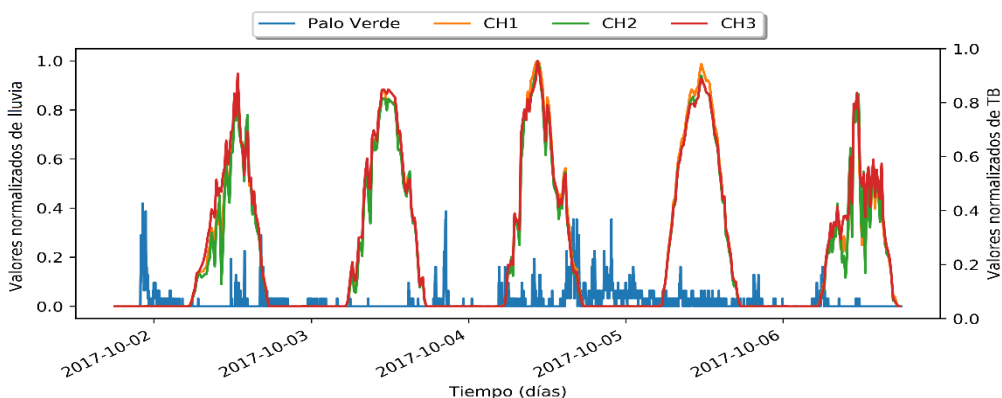


Figura A11. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

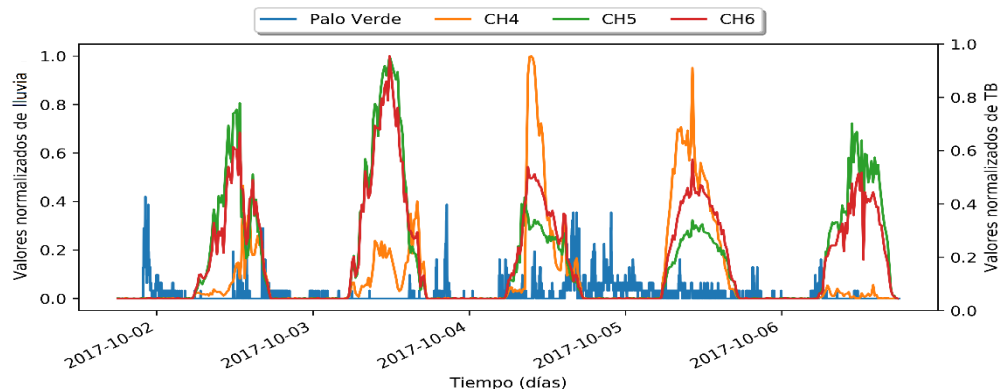


Figura A12. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

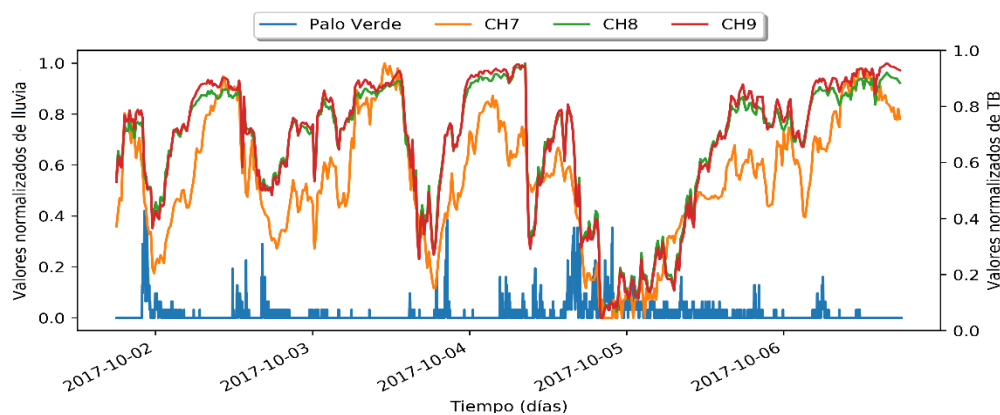


Figura A13. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

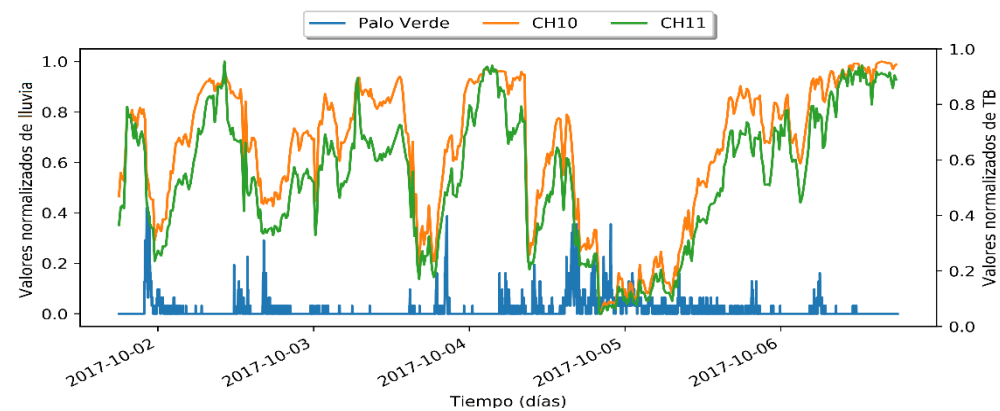


Figura A14. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

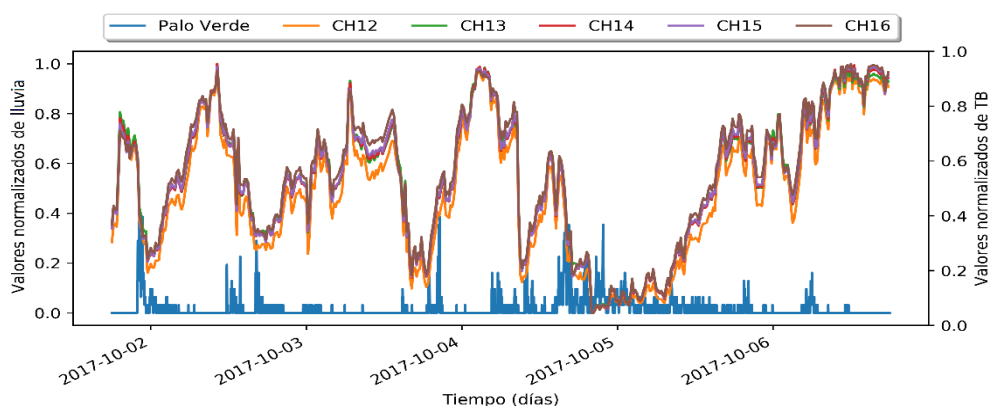


Figura A15. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

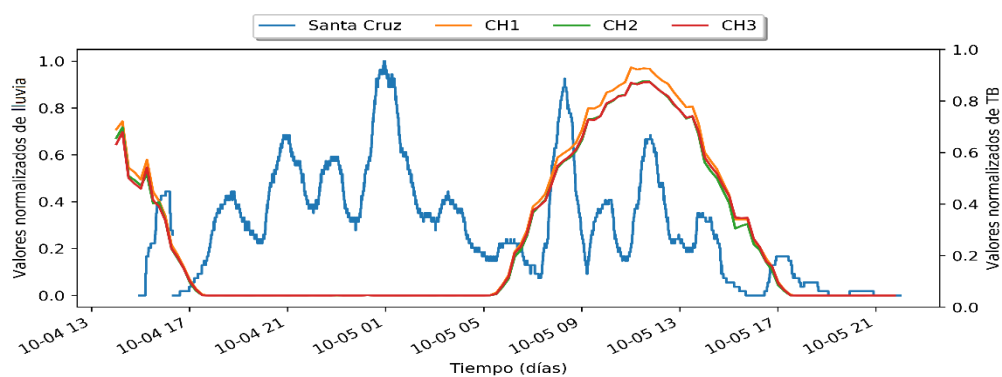


Figura A16. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

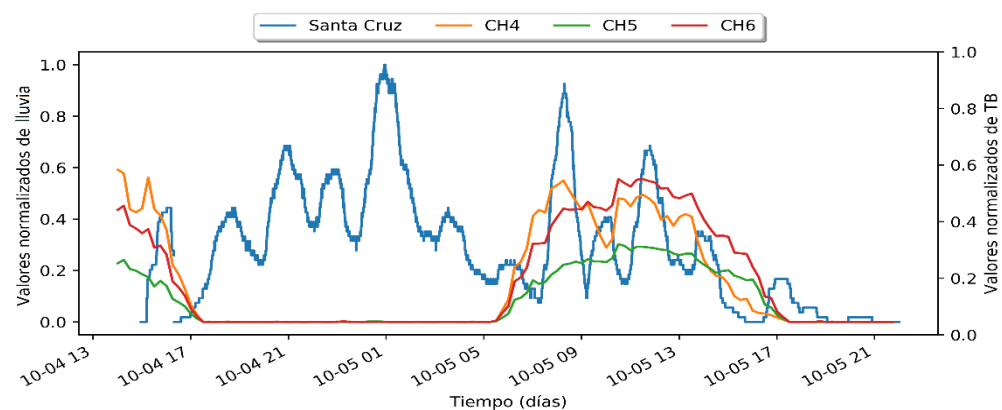


Figura A17. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

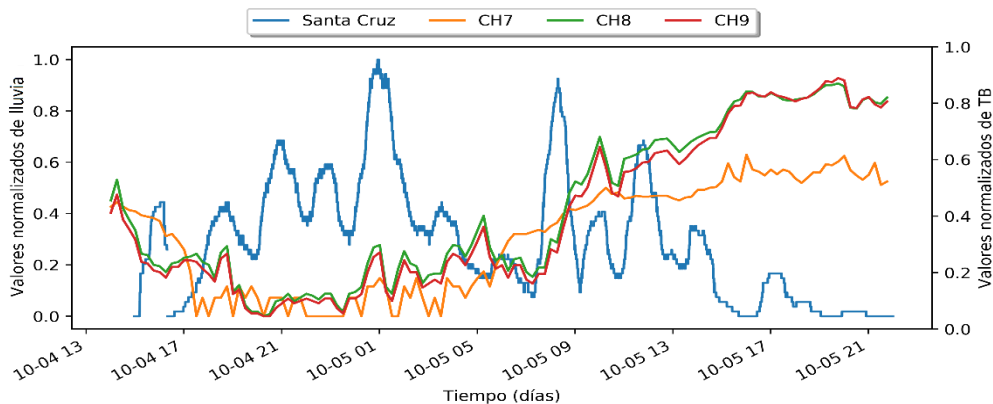


Figura A18. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

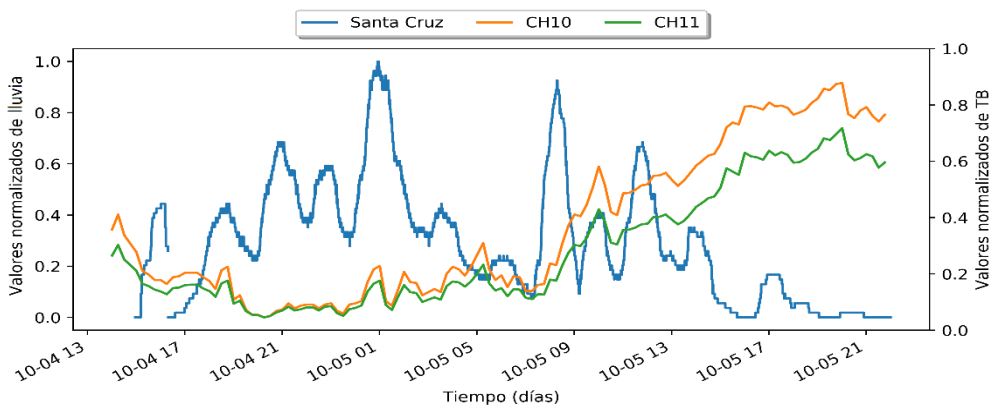


Figura A19. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

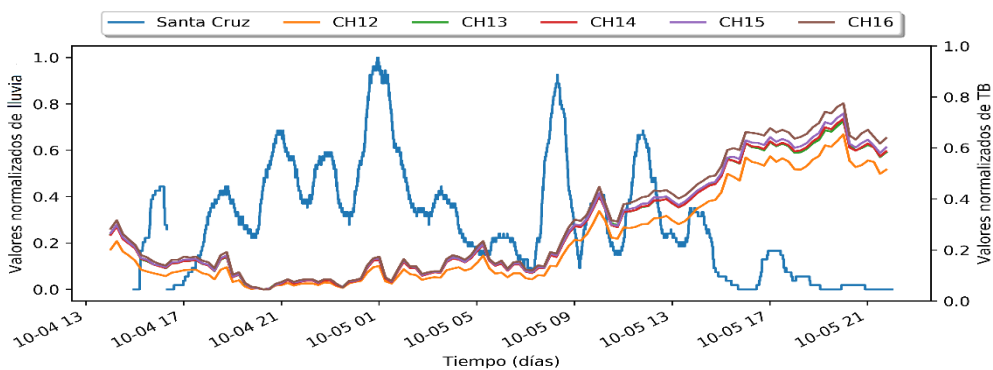


Figura A20. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

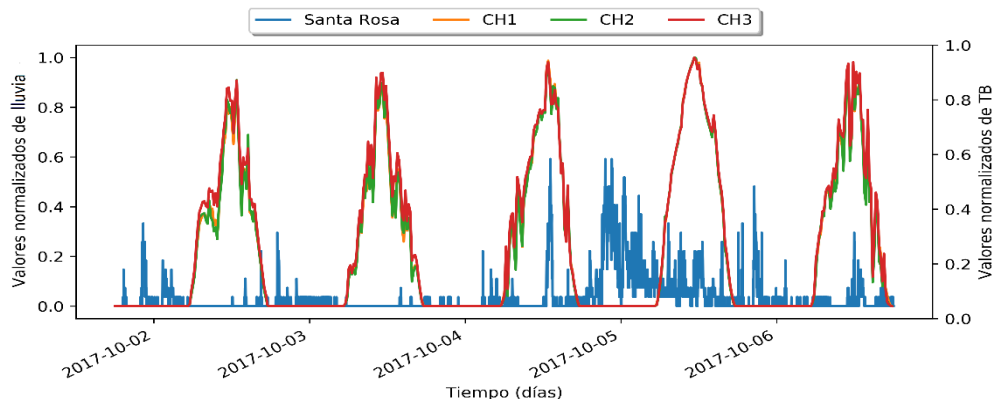


Figura A21. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

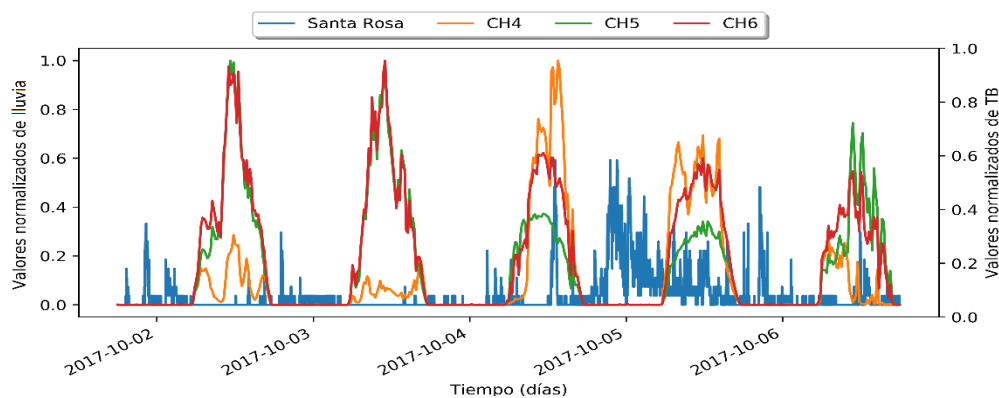


Figura A22. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

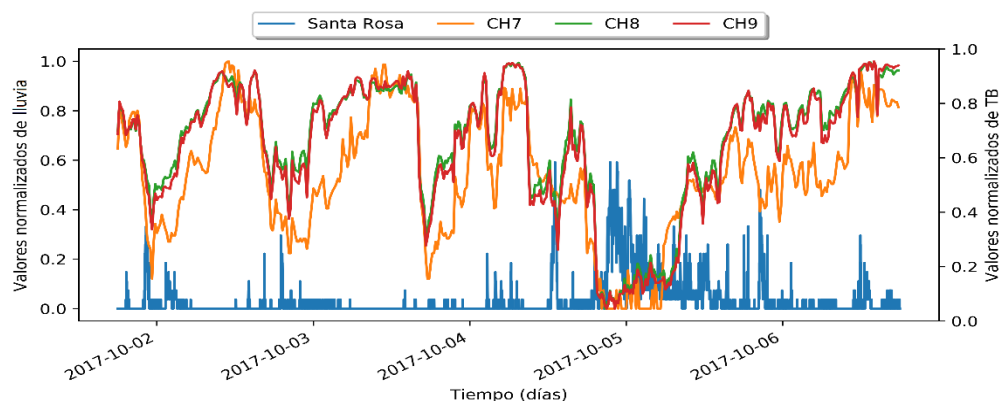


Figura A23. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

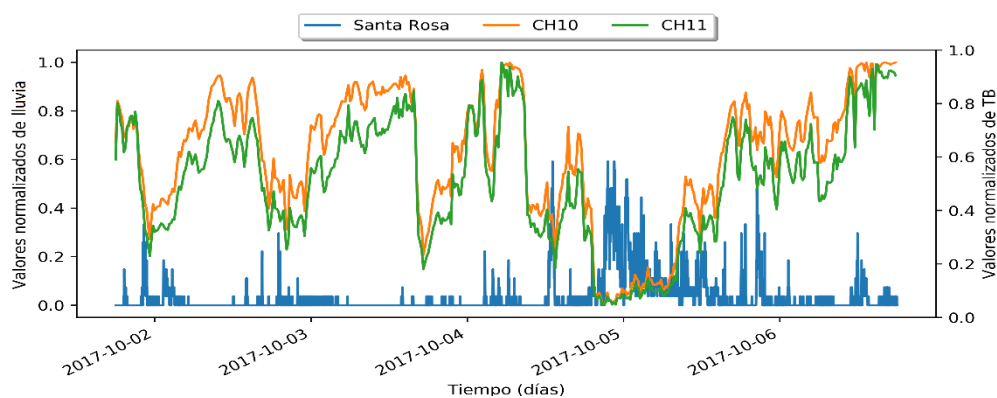


Figura A24. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

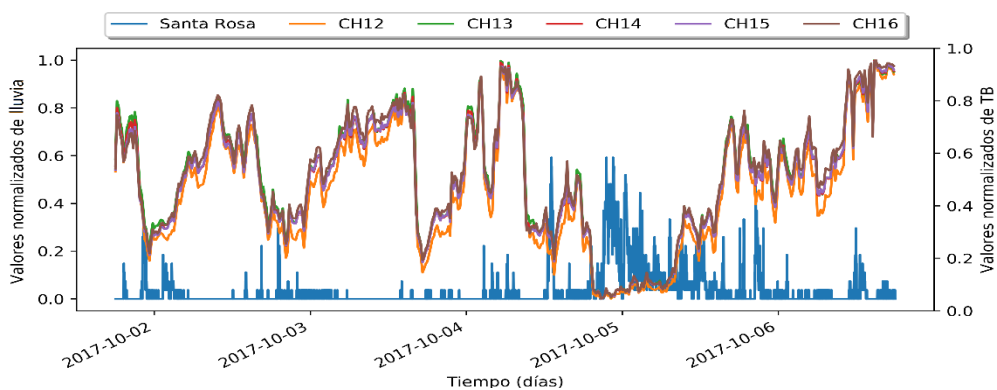


Figura A25. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

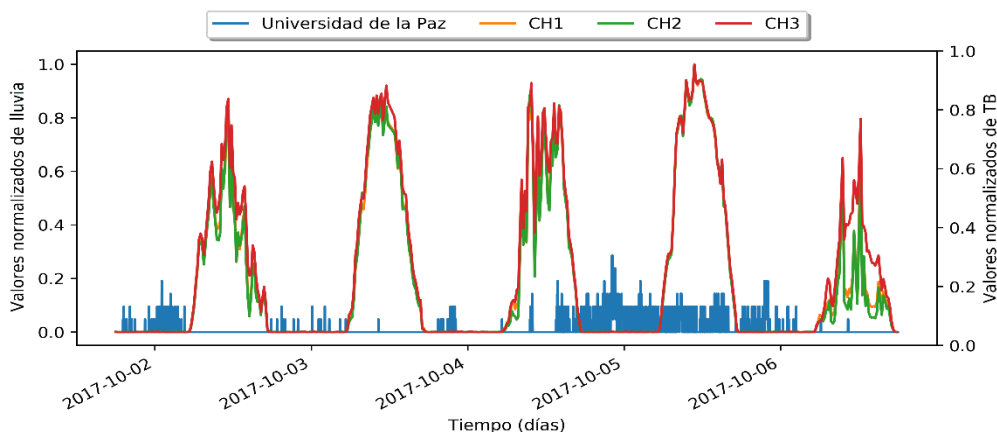


Figura A26. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 1, 2 y 3 del Satélite GOES-ESTE.

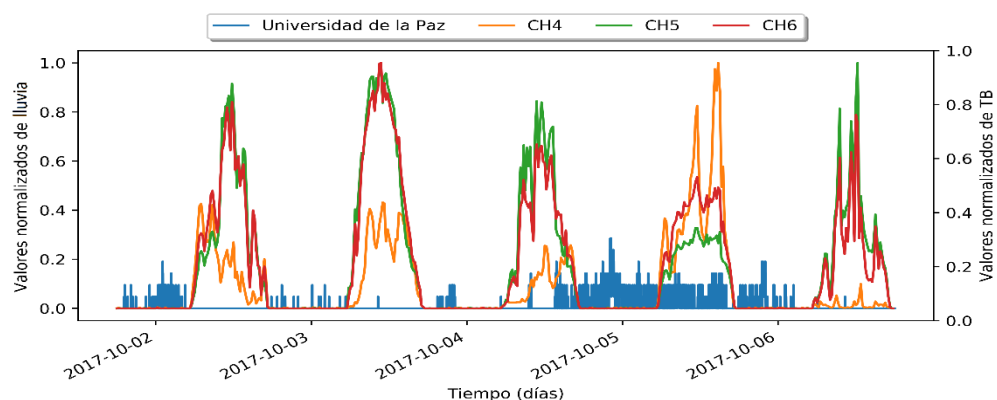


Figura A27. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 4, 5 y 6 del Satélite GOES-ESTE.

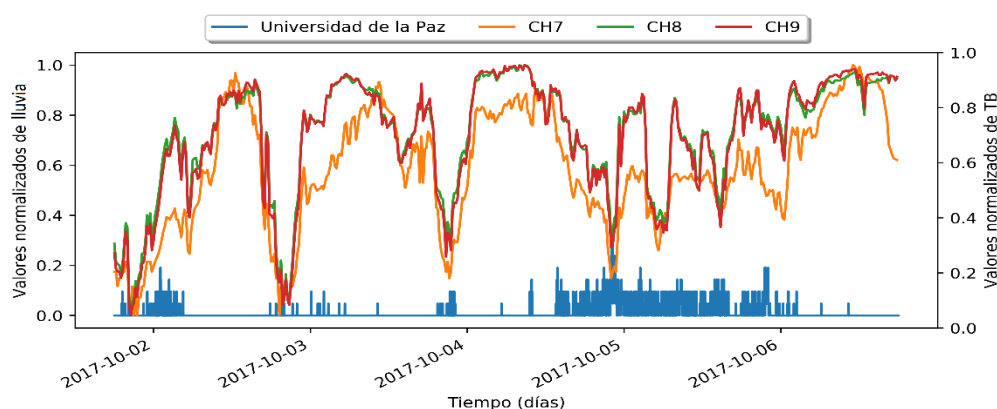


Figura A28. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del Satélite GOES-ESTE.

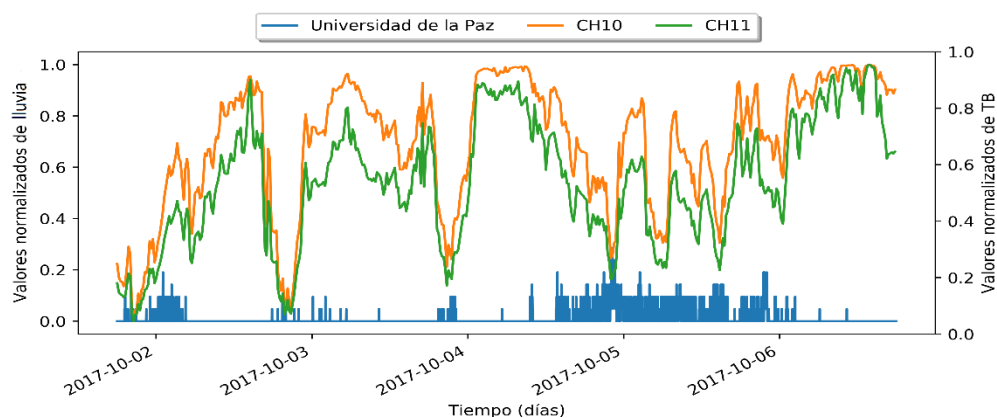


Figura A29. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del Satélite GOES-ESTE.

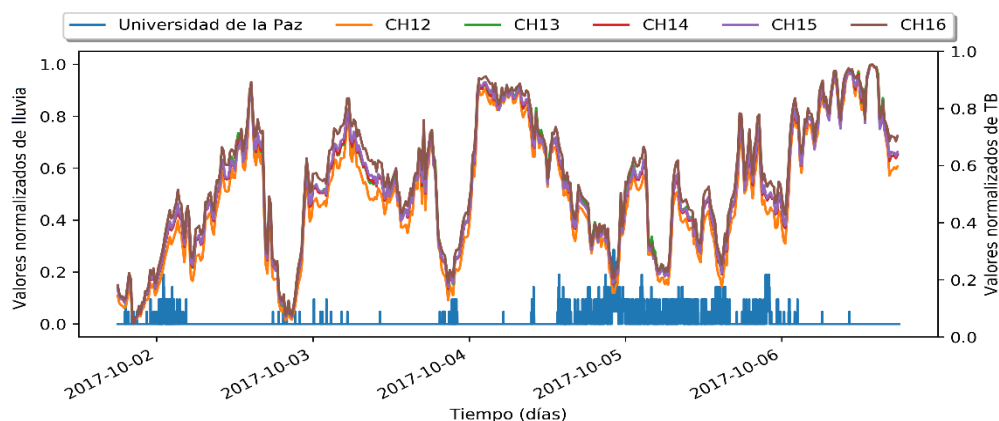


Figura A30. Series de tiempo normalizadas de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del Satélite GOES-ESTE.

Anexo 2

En estos anexos se muestran las comparaciones realizadas entre los datos de lluvia de las estaciones automáticas y los canales del satélite GOES-ESTE. Nuevamente, hacer la salvedad de que las series de tiempo de la estación de Santa Cruz poseen un menor lapso que el de las demás estaciones.

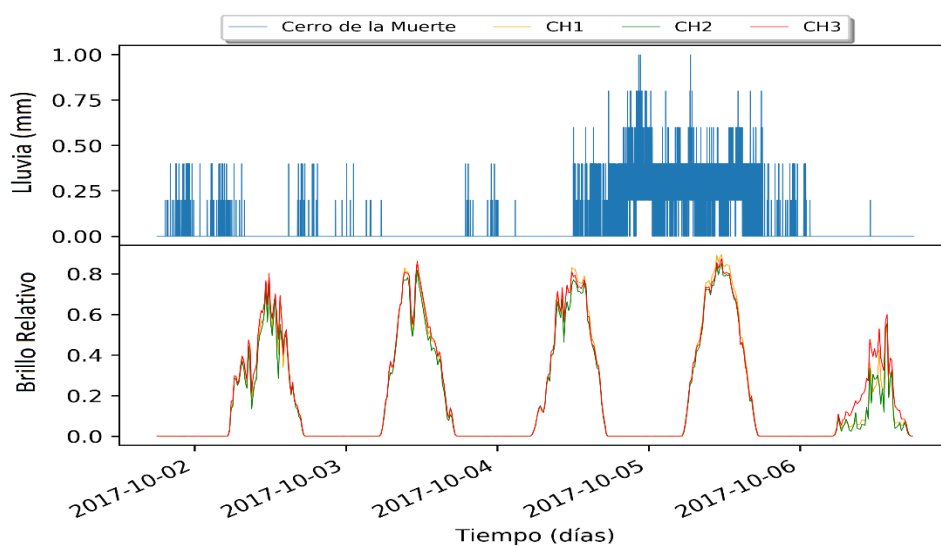


Figura A31. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

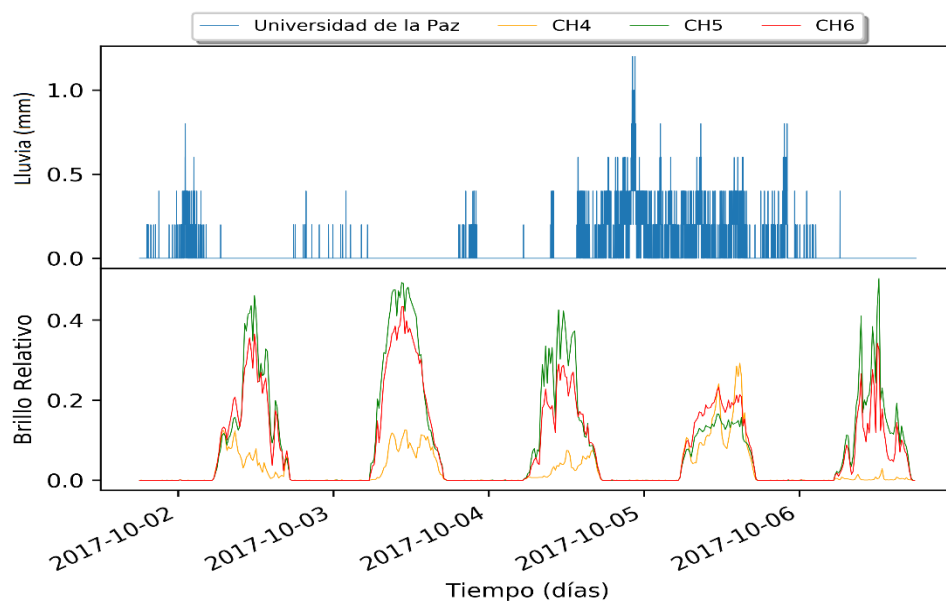


Figura A32. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

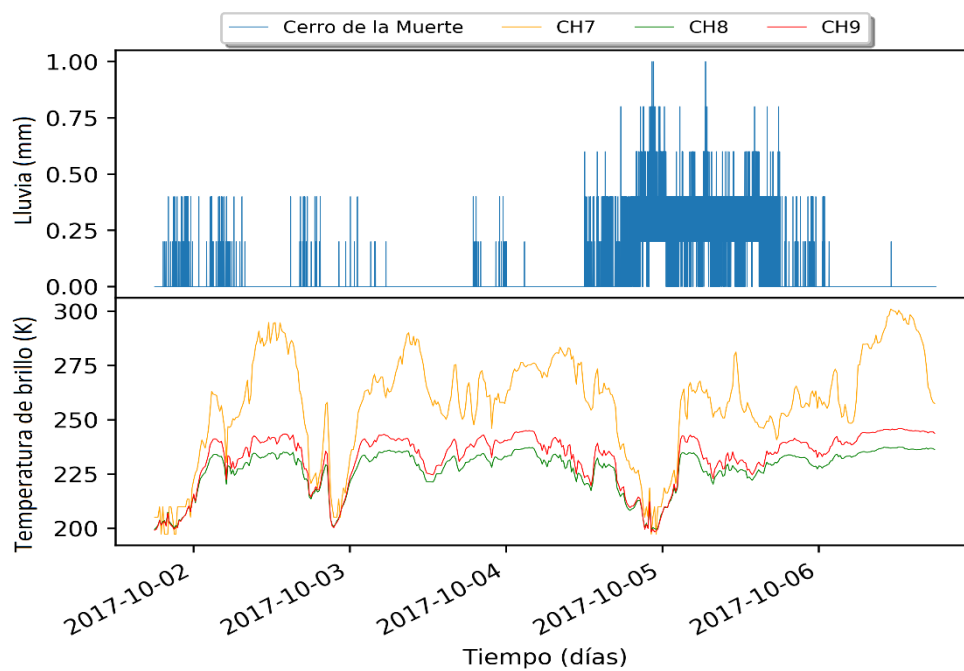


Figura A33. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

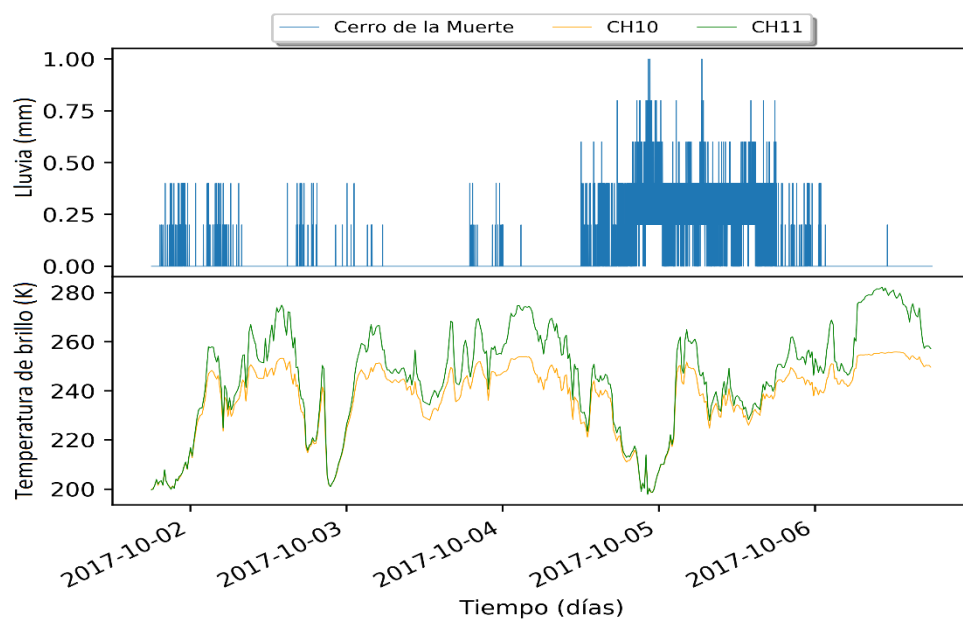


Figura A34. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

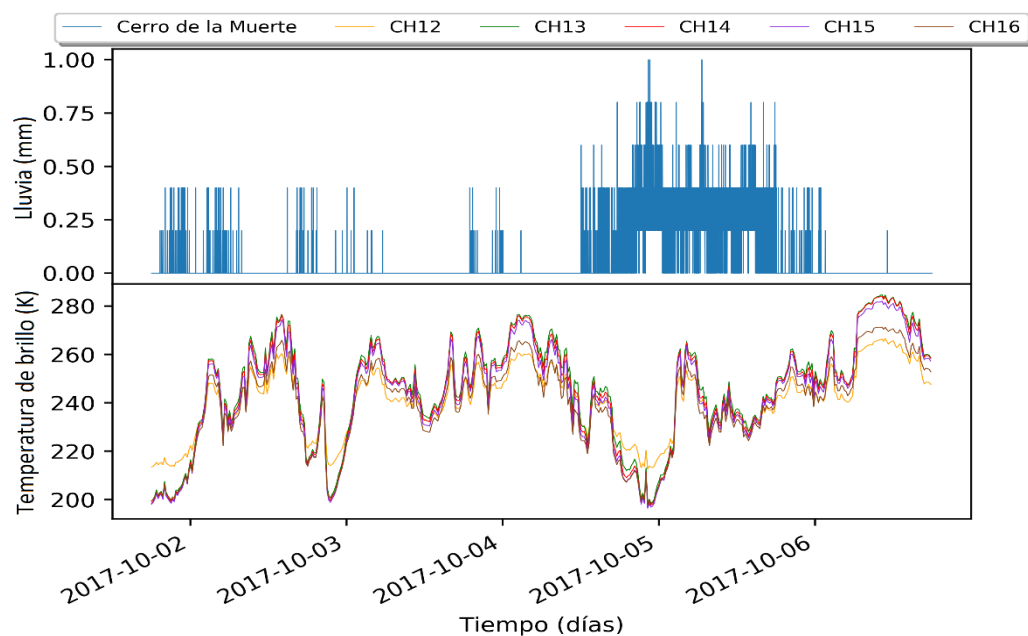


Figura A35. Series de tiempo de la lluvia en el Cerro de la Muerte y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.

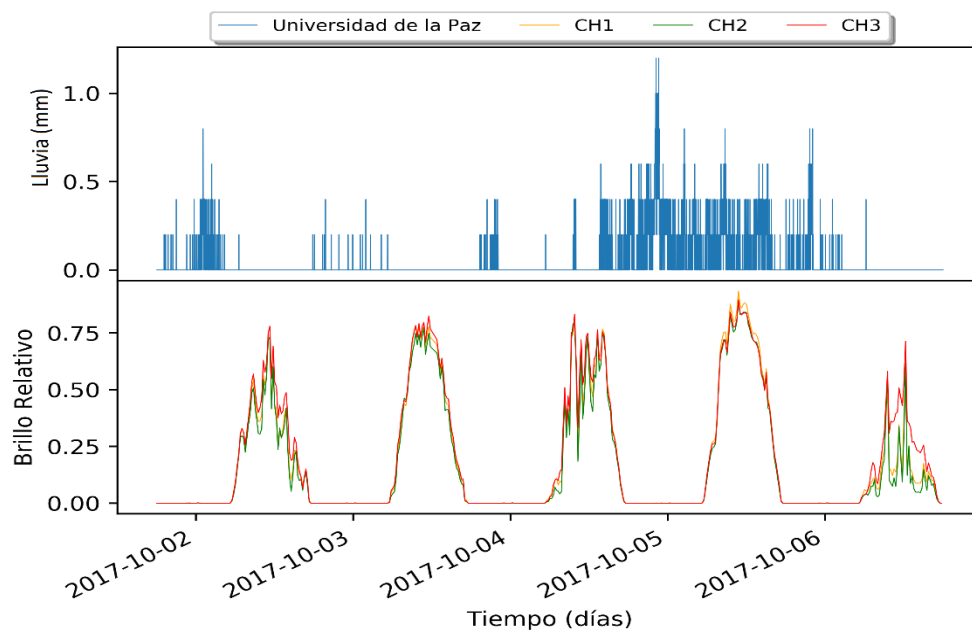


Figura A36. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

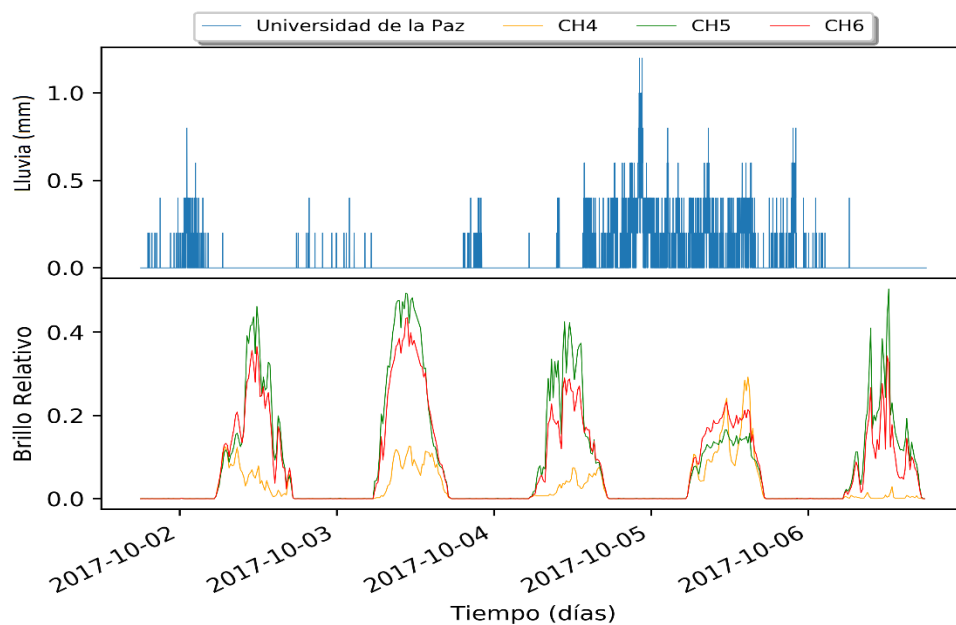


Figura A37. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

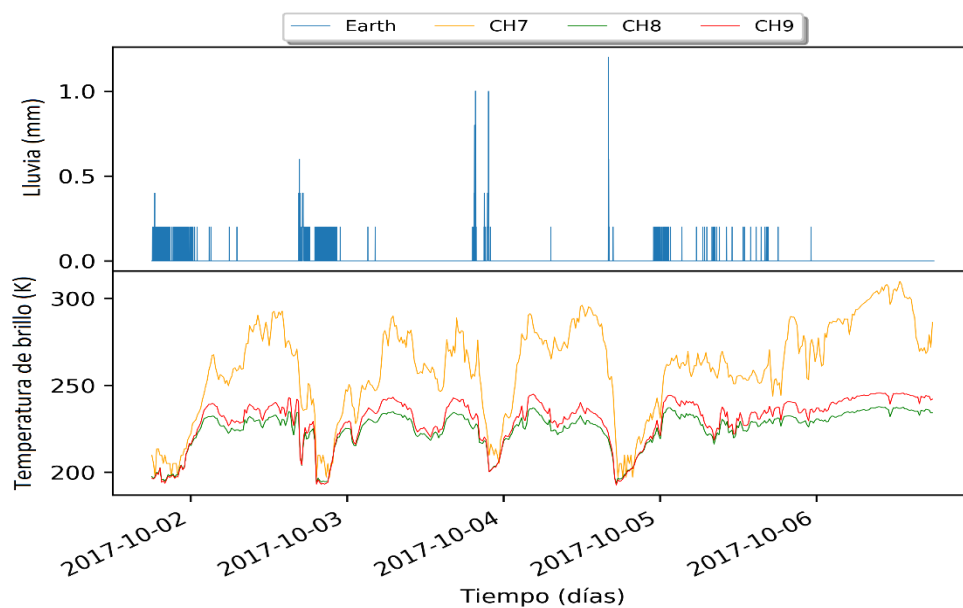


Figura A38. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

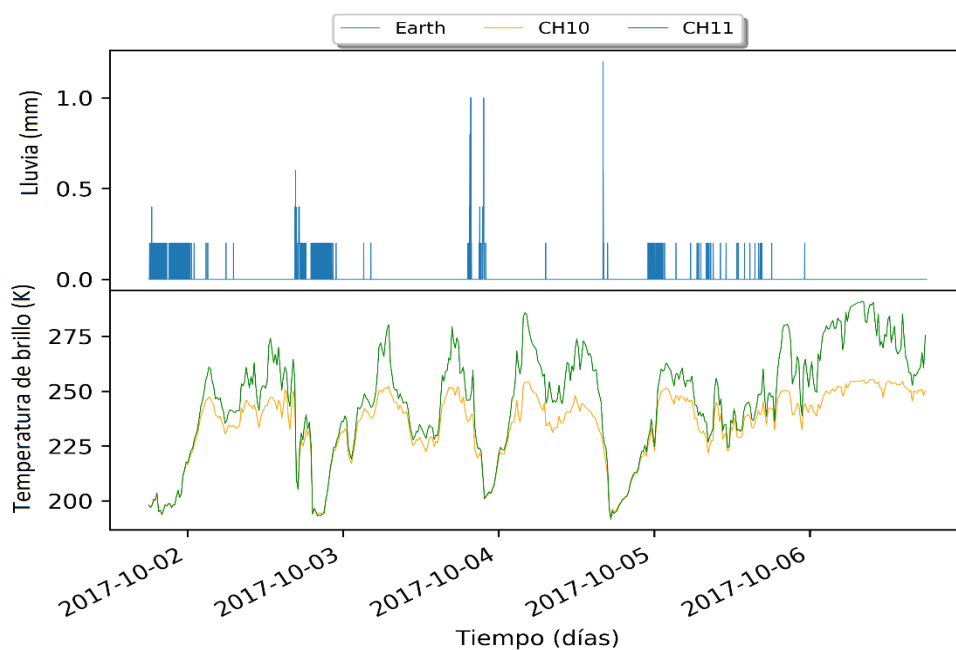


Figura A39. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

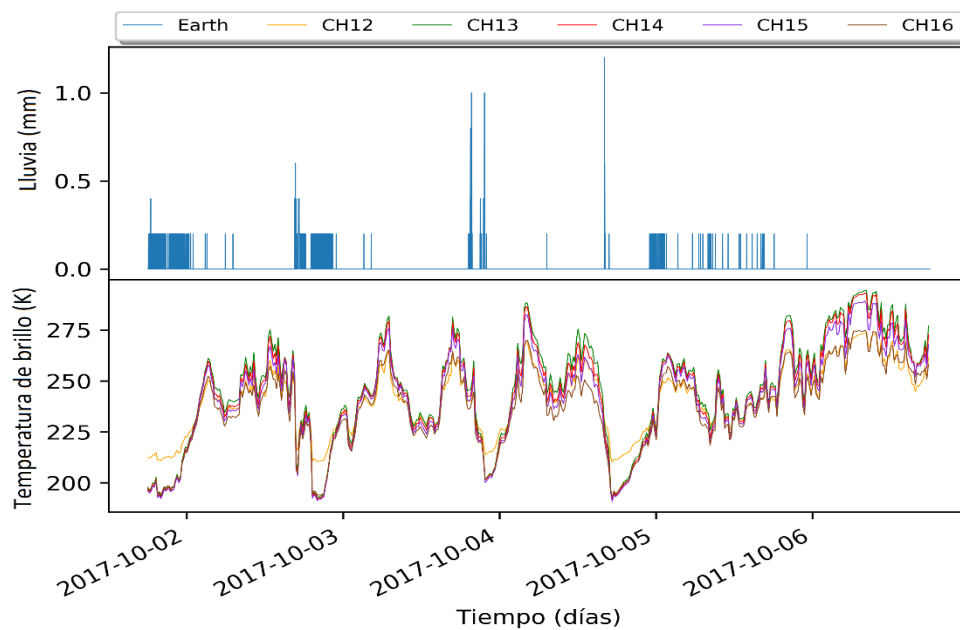


Figura A40. Series de tiempo de la lluvia en la EARTH y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.

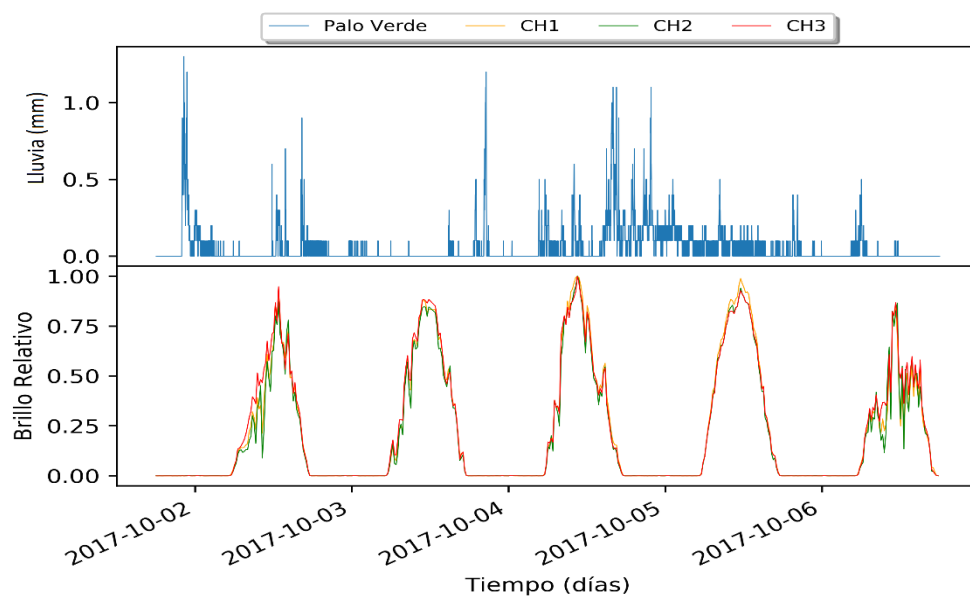


Figura A41. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

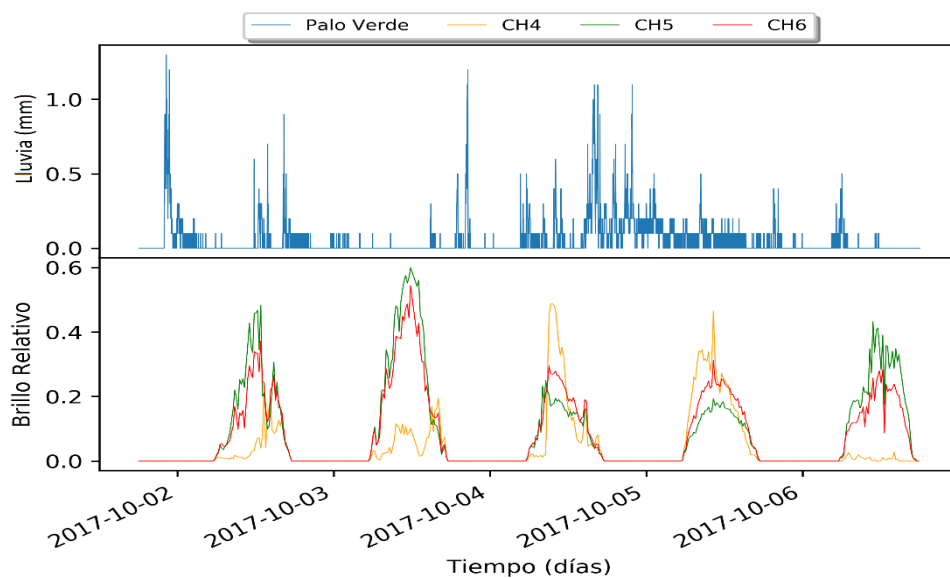


Figura A42. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

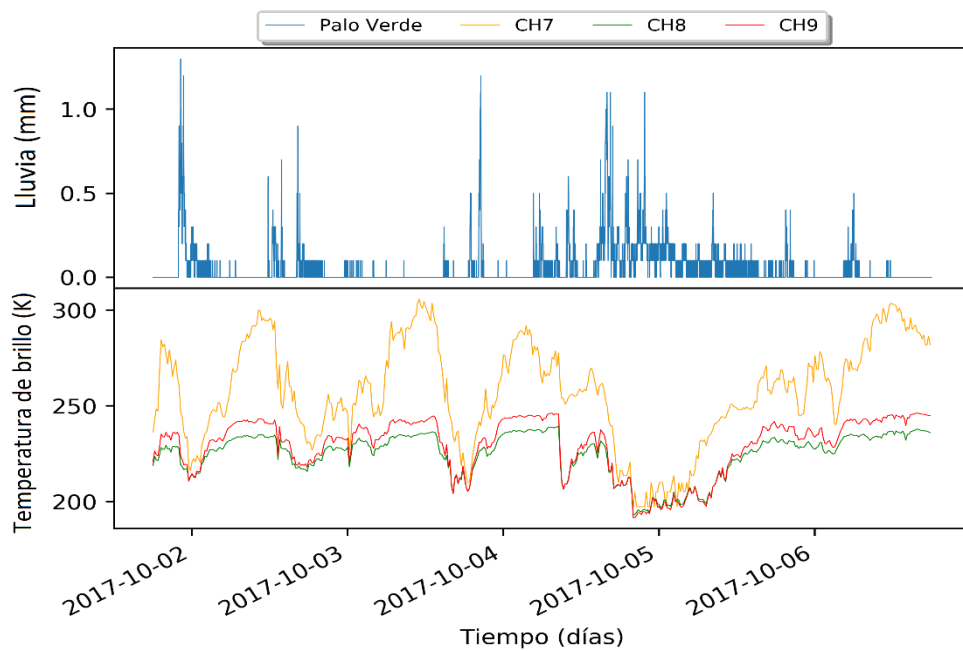


Figura A43. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

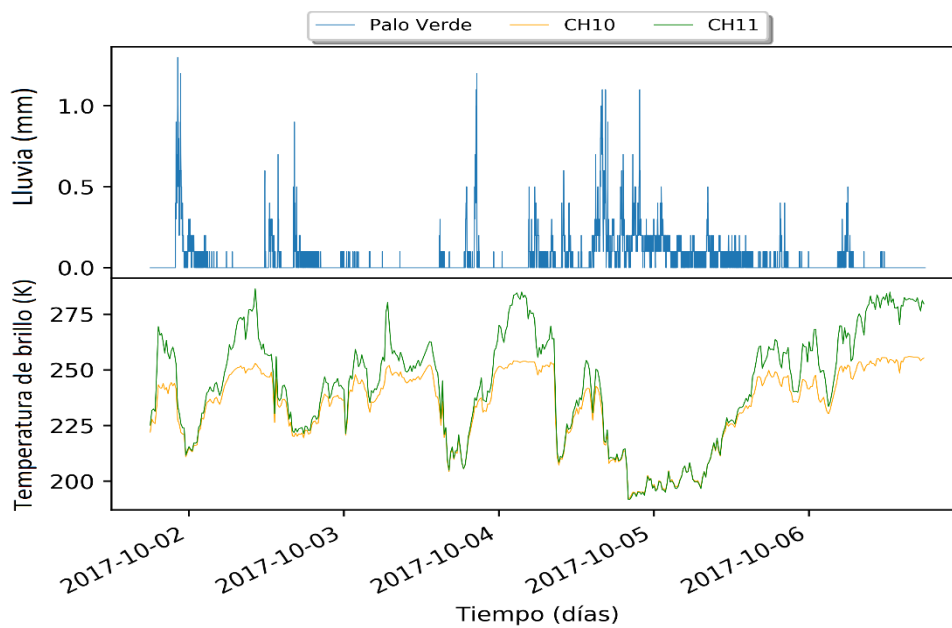


Figura A44. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

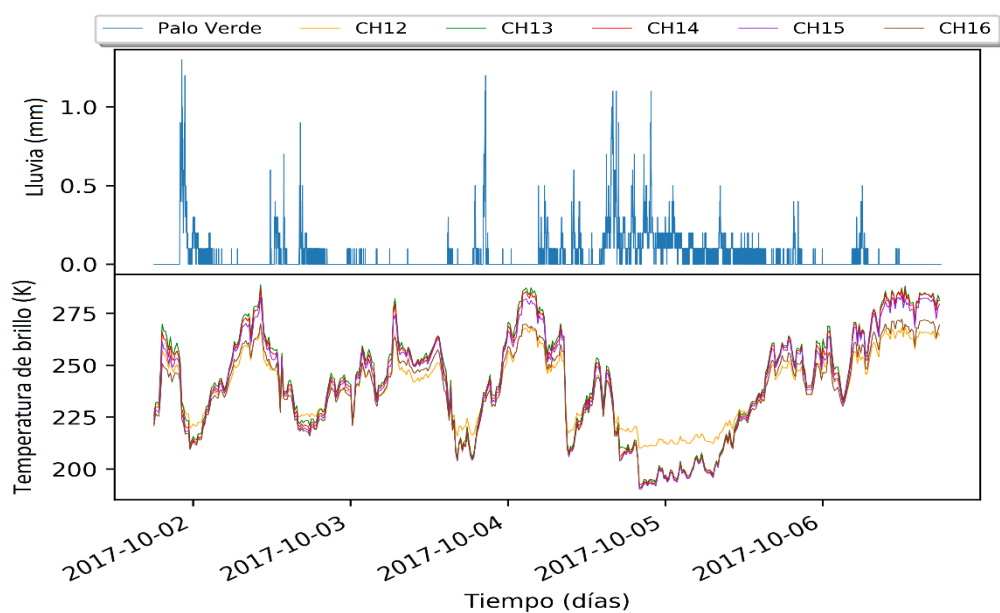


Figura A45. Series de tiempo de la lluvia en Palo Verde y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.

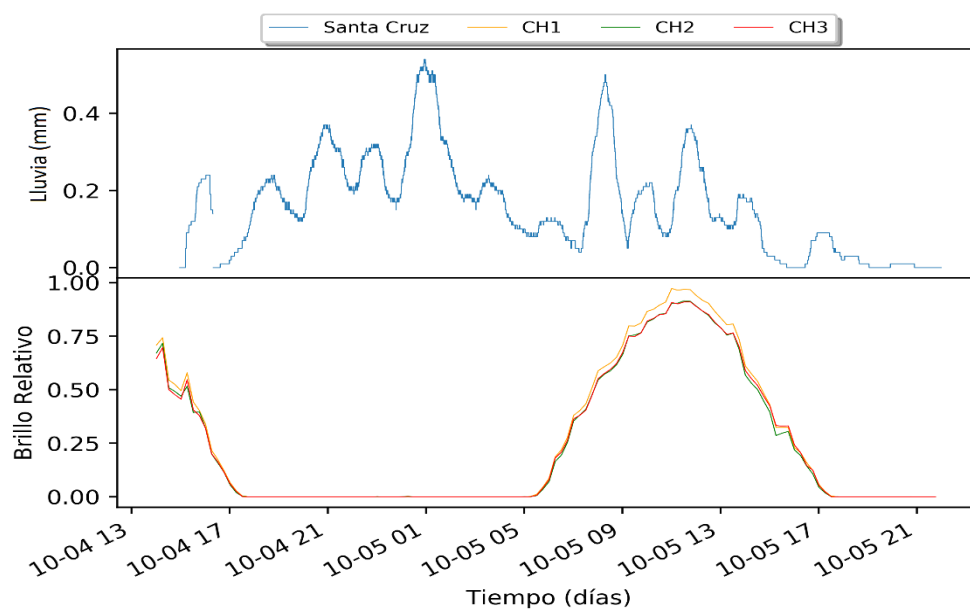


Figura A46. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

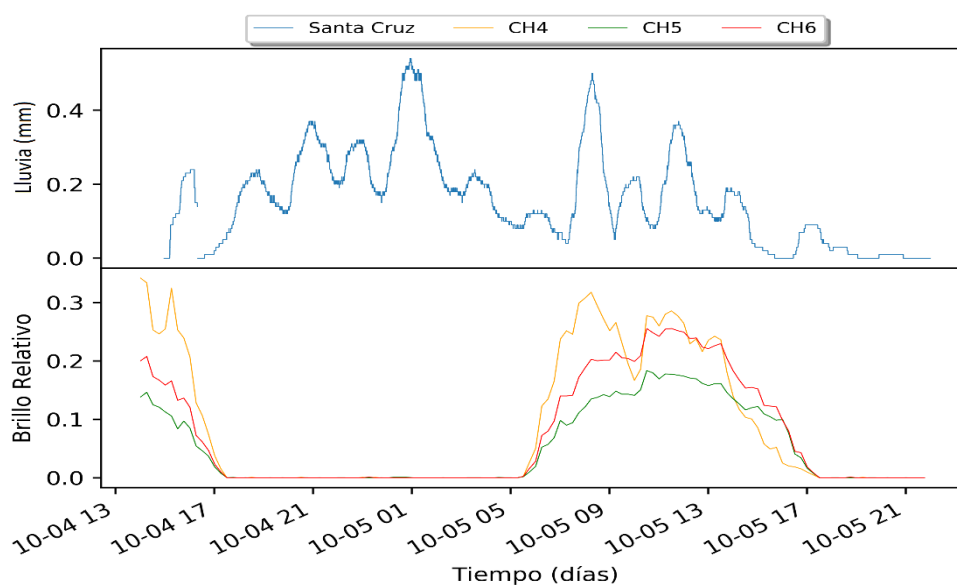


Figura A47. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

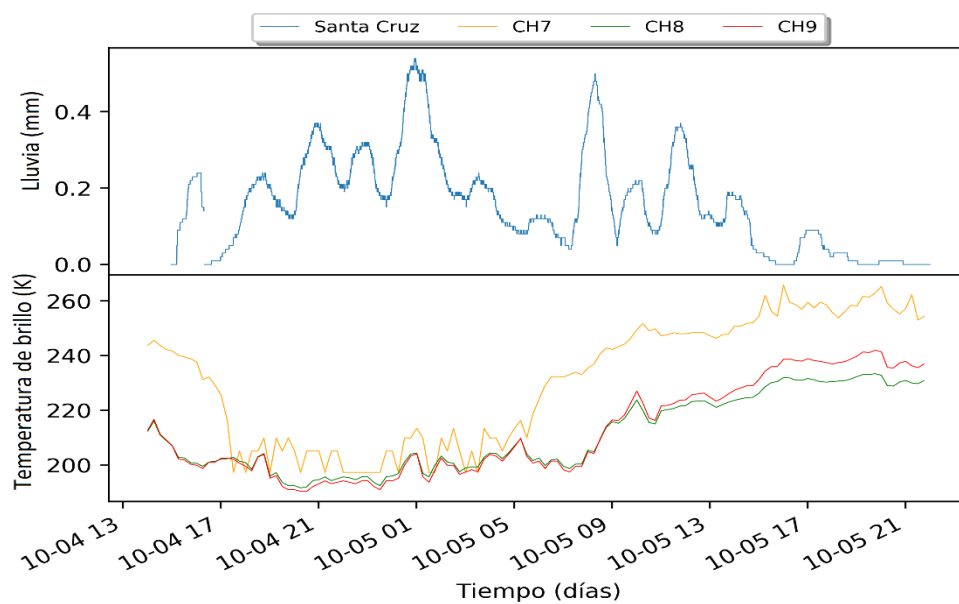


Figura A48. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

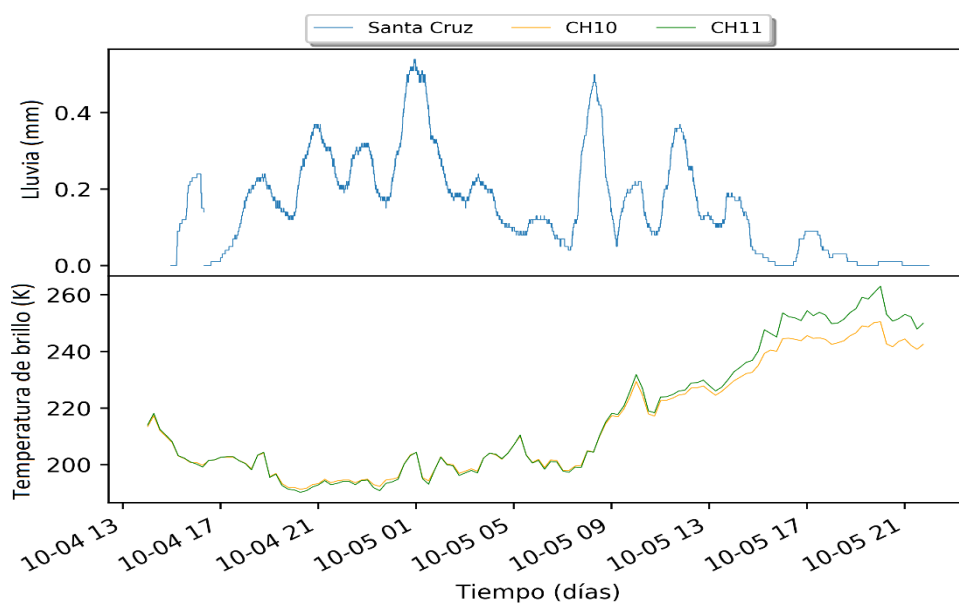


Figura A49. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

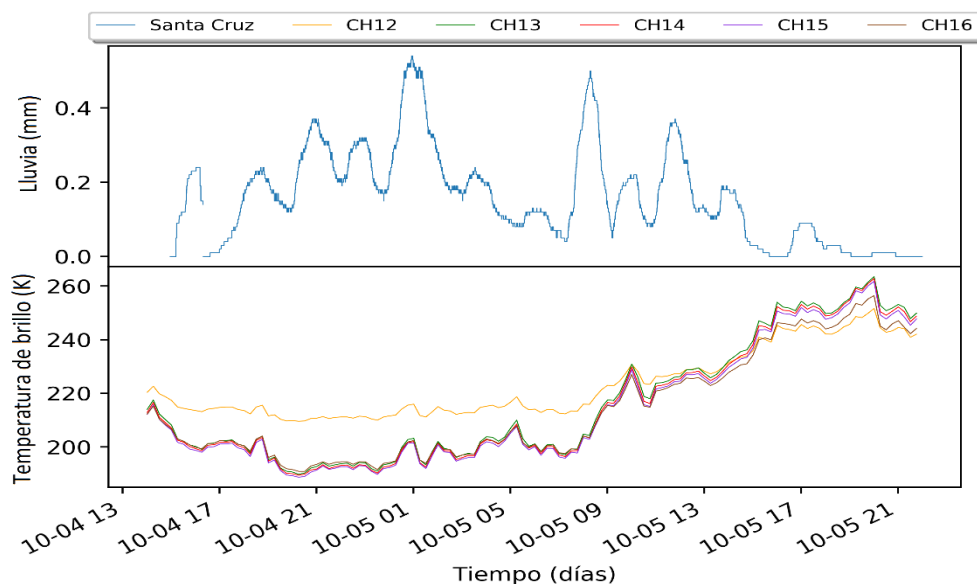


Figura A50. Series de tiempo de la lluvia en Santa Cruz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.

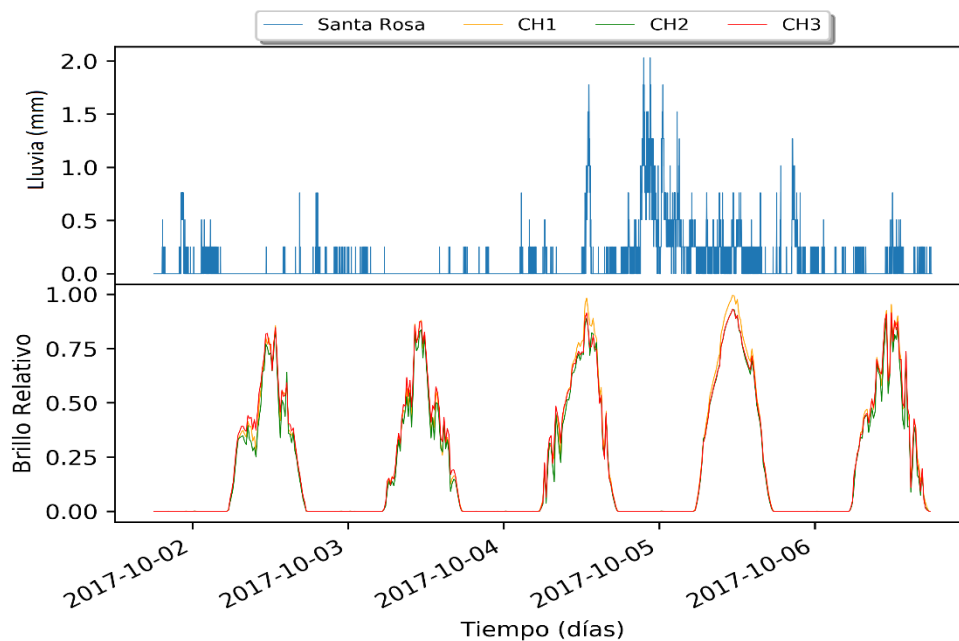


Figura A51. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

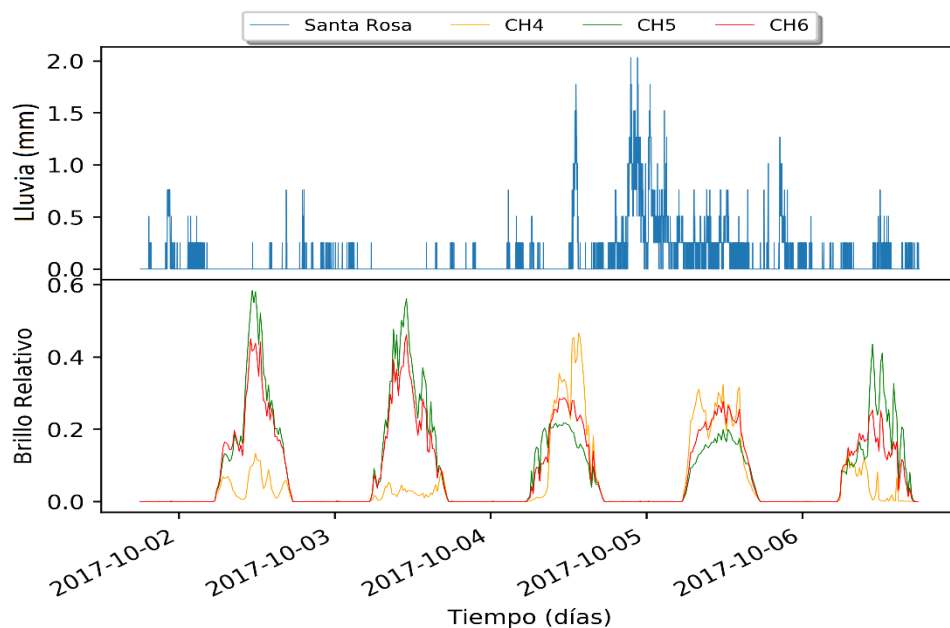


Figura A52. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

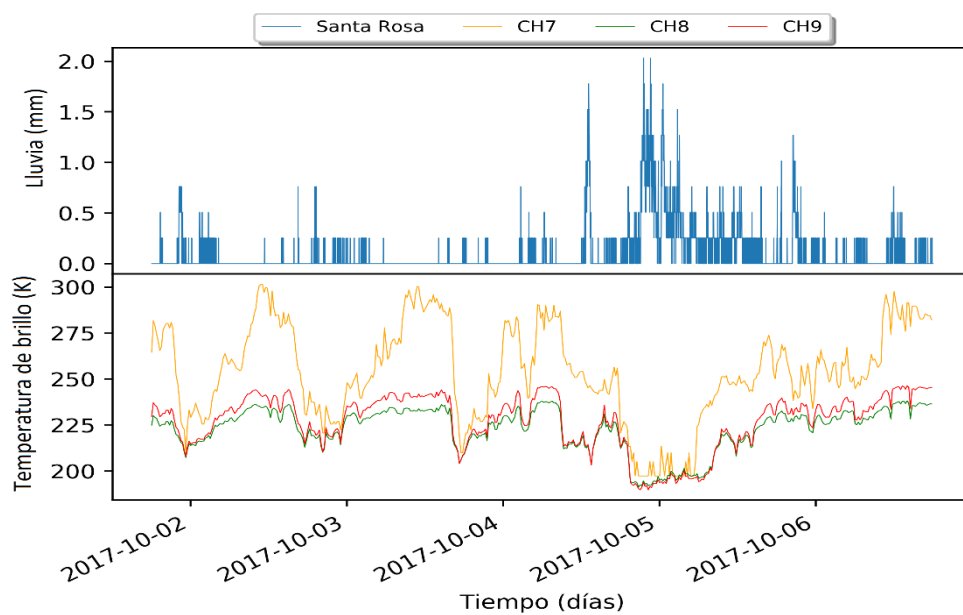


Figura A53. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

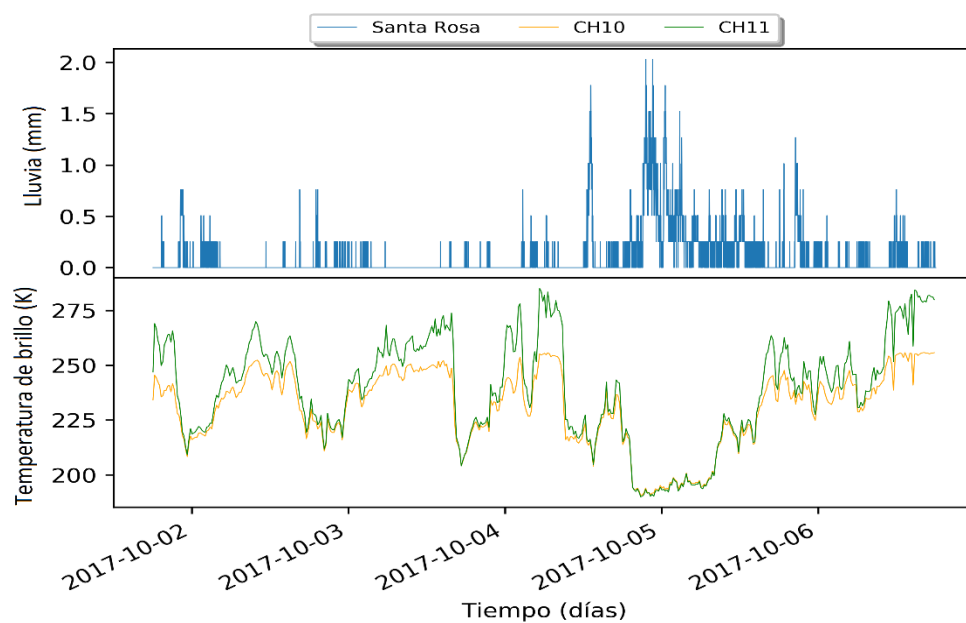


Figura A54. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

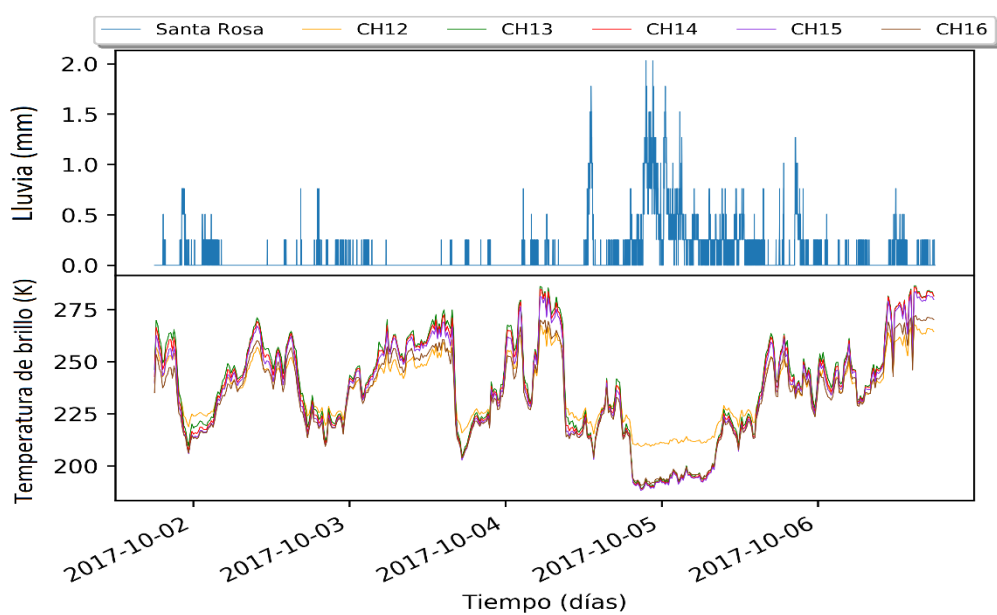


Figura A55. Series de tiempo de la lluvia en Santa Rosa y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.

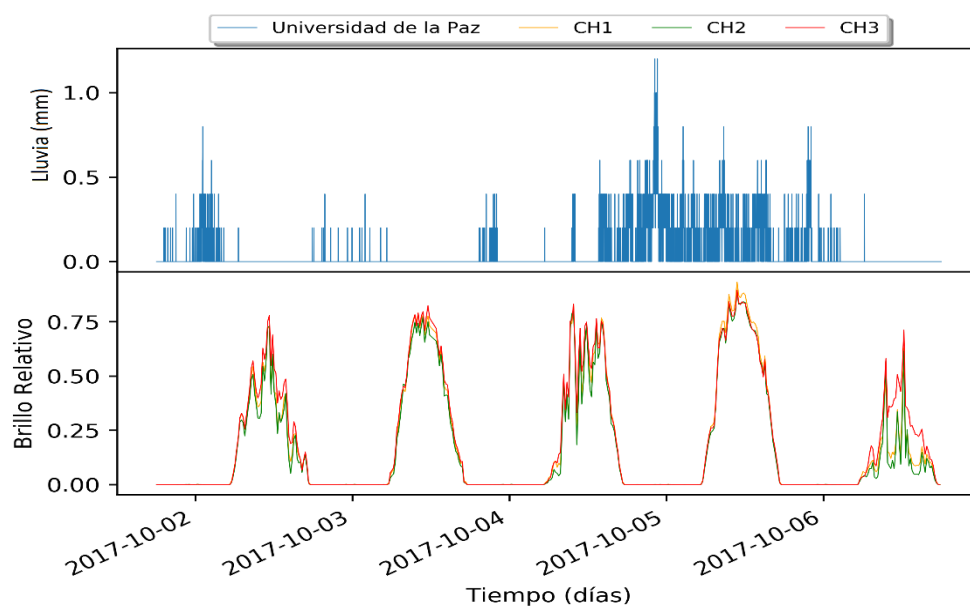


Figura A56. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de brillo relativo de los canales 1, 2 y 3 del satélite GOES-ESTE.

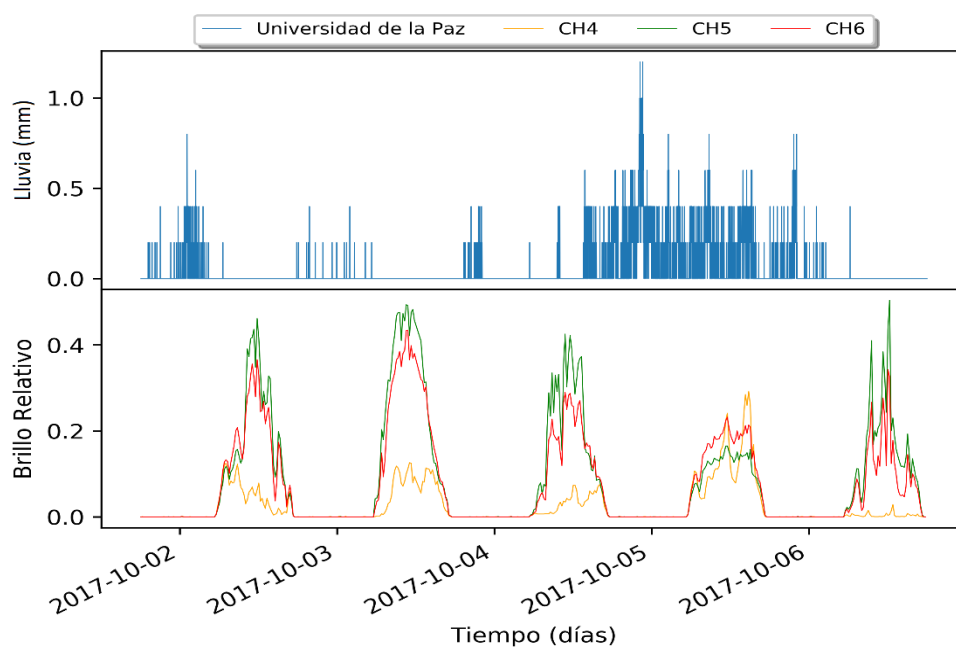


Figura A57. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de brillo relativo de los canales 4, 5 y 6 del satélite GOES-ESTE.

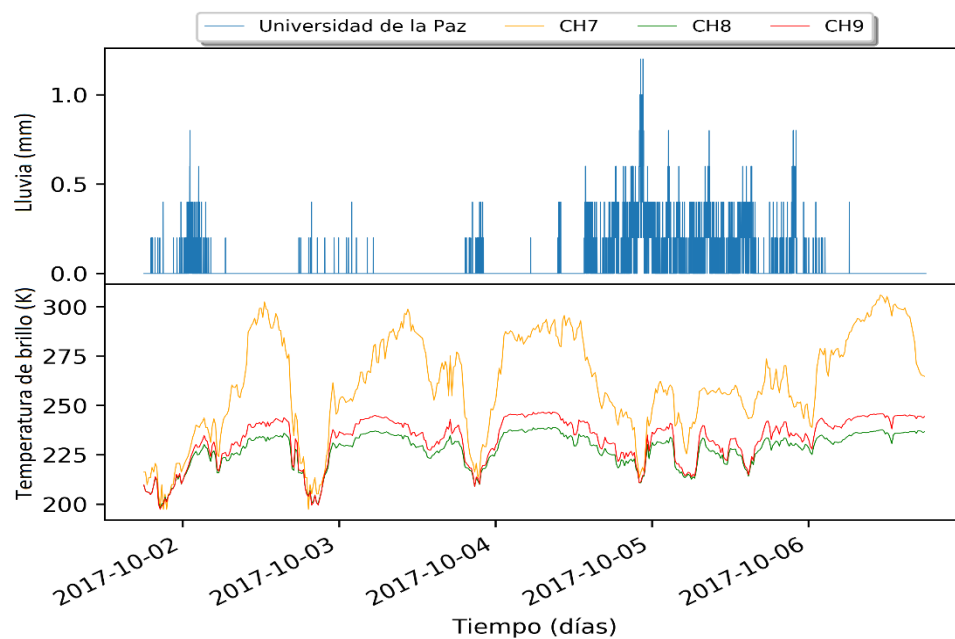


Figura A58. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 7, 8 y 9 del satélite GOES-ESTE.

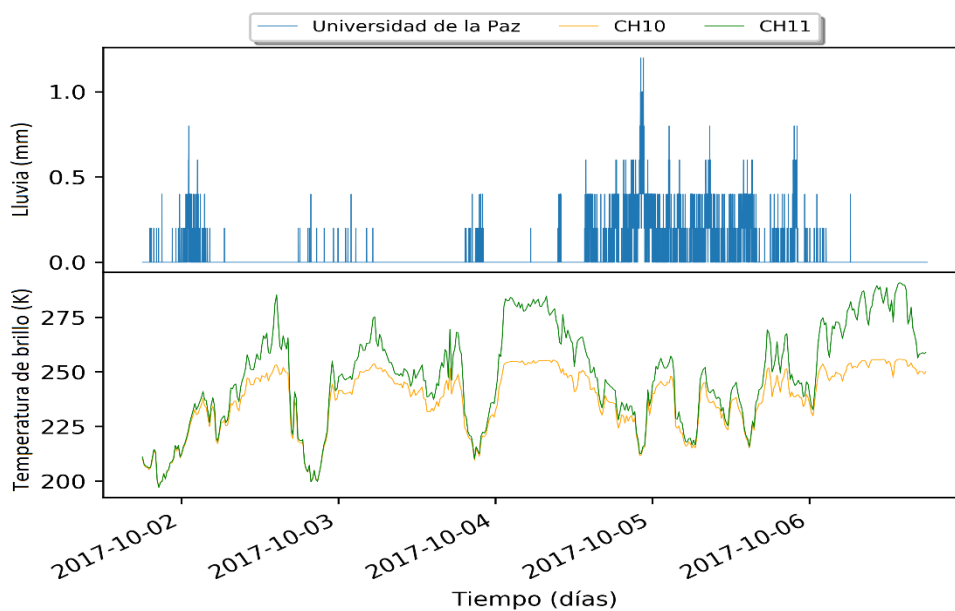


Figura A59. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 10 y 11 del satélite GOES-ESTE.

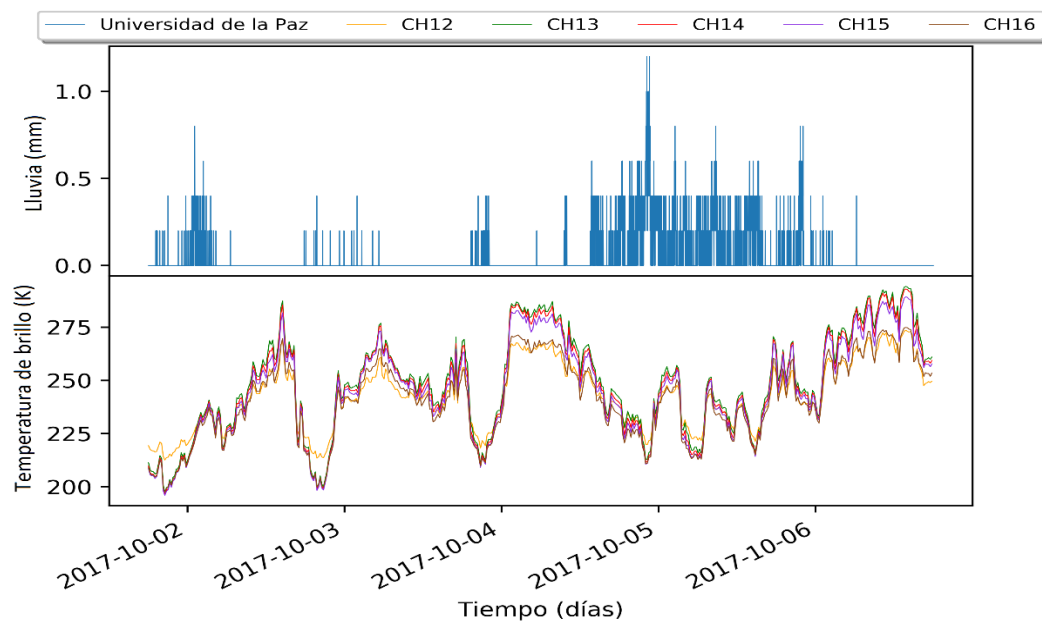


Figura A60. Series de tiempo de la lluvia en la Universidad de la Paz y de la temperatura de brillo de los canales 12, 13, 14, 15 y 16 del satélite GOES-ESTE.